



---

# **BACHELORARBEIT**

---

Herr  
**Philipp Fechner**

**Die Lichtfeldtechnologie als  
Aufnahmetechnik für Stereo  
3D – Simulation einer stereos-  
kopischen Sequenz mit einer  
plenoptischen Handkamera**

**2015**

# **BACHELORARBEIT**

---

## **Die Lichtfeldtechnologie als Aufnahmetechnik für Stereo 3D – Simulation einer stereos- kopischen Sequenz mit einer plenoptischen Handkamera**

Autor/in:  
**Herr Philipp Fechner**

Studiengang:  
**Medientechnik**

Seminargruppe:  
**MT11wF-B**

Erstprüfer:  
**Prof. Christoph Amrhein**

Zweitprüfer:  
**B.Eng. / M.A. Constanze Hundt**

Einreichung:  
**Mittweida, 06.07.2015**

# **BACHELOR THESIS**

---

## **The light field technology as a technique for recording stereo 3D – simulation of a stereos- copic sequence with a hand- held plenoptic camera**

author:

**Mr. Philipp Fechner**

course of studies:

**media engineering**

seminar group:

**MT11wF-B**

first examiner:

**Prof. Christoph Amrhein**

second examiner:

**B.Eng. / M.A. Constanze Hundt**

submission:

**Mittweida, 06.07.2015**

---

## **Bibliografische Angaben**

Fechner, Philipp:

Die Lichtfeldtechnologie als Aufnahmetechnik für Stereo 3D – Simulation einer stereoskopischen Sequenz mit einer plenoptischen Handkamera

The light field technology as a technique for recording stereo 3D – simulation of a stereoscopic sequence with a Hand held plenoptic camera

74 Seiten,

Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,  
Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2015

## **Abstract**

Die Lichtfeldtechnologie ist eine junge Aufnahmetechnik, die erst in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen hat. Neben dem industriellen Einsatz bietet die Lichtfeldtechnik ebenso für den Bereich der Medien einige interessante Neuerungen. In dieser Arbeit werden die Verwendung dieser Technik für die Stereoskopie untersucht und die Arbeitsschritte für Stereobildgewinnung beschrieben. Desweiteren wird auf die Möglichkeiten eingegangen die sich allgemein für die Postproduktion eröffnen können.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Formelverzeichnis.....</b>	<b>IX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Kenngrößen für Stereo 3D.....</b>	<b>2</b>
2.1 Der menschliche Sehprozess.....	2
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise des menschlichen Auges .....	2
2.1.2 Akkommodation .....	4
2.1.3 Vom Auge zum Gehirn .....	4
2.1.4 Augenbewegung .....	5
2.2 Monokulare Tiefenwahrnehmung .....	6
2.2.1 Perspektive, Größe und Position.....	6
2.2.2 Verdeckung und Überlappung.....	7
2.2.3 Licht und Schatten .....	7
2.3 Binokulare Tiefenwahrnehmung.....	8
2.3.1 Vergenzen und Scheinfensterenebene .....	8
2.3.2 Die Parallaxe / Disparität.....	9
2.3.3 Stereobasis, Hyperstereo und Hypostereo.....	11
2.3.4 Horopter und Panumraum.....	12
2.3.5 Fusion, binokulare Summation und Stereopsis .....	13
2.4 Technische Voraussetzung für sauberes S3D.....	13
2.4.1 Störeffekte .....	13
2.4.2 Unschärfeartefakte.....	14
2.4.3 Technische Voraussetzungen .....	14
2.5 Aufnahmeverfahren in der Stereoskopie .....	15
2.5.1 Side-by-Side .....	15
2.5.2 Spiegel-Rig .....	16
2.5.3 Kompaktkameras .....	17
2.6 Wiedergabemöglichkeiten in der Stereoskopie.....	18
2.6.1 Anaglyphenverfahren .....	18
2.6.2 Polarisationsverfahren .....	20
2.6.3 Autostereoskopische Displays .....	21
<b>3 Grundlagen zur Lichtfeldkamera.....</b>	<b>23</b>

---

3.1	Das Lichtfeld und die plenoptische Funktion .....	23
3.2	Funktionsweise der Lichtfeldaufnahmetechnik .....	24
3.2.1	Der prinzipielle Aufbau einer Lichtfeldkamera .....	25
3.2.2	Ausrichtung der Mikrolinsen .....	26
3.3	Bildgewinnung in einer Lichtfeldkamera .....	28
3.3.1	Die Bildentstehung und das Lichtfeld innerhalb einer digitalen Kamera .....	28
3.3.2	Das abgetastete Lichtfeld innerhalb einer plenoptischen Kamera .....	31
3.3.3	Ansichtsmöglichkeiten für ein aufgezeichnetes Lichtfeld .....	33
3.4	Möglichkeiten der Nachbearbeitung eines aufgenommenen Lichtfeldbildes .....	36
3.4.1	Theoretische Änderung des Strahlen-Raums bei der Fokussierung .....	37
3.4.2	Die digitale Refokussierung und Erweiterung der Schärfentiefe .....	38
3.4.3	Mehrere Blickwinkel und Stereobildgewinnung .....	41
<b>4</b>	<b>Versuchsvorbereitungen .....</b>	<b>44</b>
4.1	Konzept für den Versuchsaufbau .....	44
4.2	Vorstellung der Kamera „Lytro Illum“ .....	45
4.2.1	Technische Daten und Kurzbeschreibung .....	45
4.2.2	Der Refokussierbereich und das Tiefenhistogramm .....	46
4.3	Verwendete Software für die Bildverarbeitung .....	48
4.3.1	Lytro Desktop .....	48
4.3.2	Stereo Photo Maker und Stereo Movie Maker .....	49
4.4	Überlegungen vor der Durchführung .....	50
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung Stereo 3D .....</b>	<b>51</b>
5.1	Motivbeschreibung und die Vorgehensweise vor Ort .....	51
5.1.1	Das Motiv für die Sequenz „Wolkenzug“ .....	51
5.1.2	Das Motiv für die Sequenz „Sonnenuntergang“ .....	52
5.1.3	Das Motiv für die Sequenz „Skulptur“ .....	53
5.1.4	Das Motiv für die Sequenz „Netzlampe“ .....	54
5.1.5	Das Motiv für die Sequenz „Treppengang“ .....	55
5.2	Gewinnung der Einzelbilder für die stereoskopischen Sequenzen .....	56
5.2.1	Speicherung der Rohdaten und das verwendete Dateiformat ..	56
5.2.2	Verwaltung und Import der Rohdaten in Lytro Desktop .....	56

---

5.2.3	Export der Daten als Side-by-Side-Bilder und Trennung der Bilder für die weitere Bearbeitung .....	57
5.3	Erstellung der stereoskopischen Sequenzen.....	60
5.3.1	Anfertigung der Teilbildsequenzen .....	60
5.3.2	Schwierigkeiten und entstandene Fehler.....	61
5.3.3	Fehlerkorrektur.....	62
5.3.4	Anfertigung der stereoskopischen Sequenzen in Side-by-Side und als Color-Anaglyphen .....	63
5.4	Neuausrichtung des Fokus, Schärfentiefenausdehnung und perspektivische Verschiebung als gestalterische Möglichkeiten .....	65
5.4.1	Arbeitsschritte Fokusneuausrichtung der Refokussed-Sequenzen.....	65
5.4.2	Arbeitsschritte Schärfentiefenausdehnung für die All in Focus-Sequenzen.....	67
5.4.3	Arbeitsschritte perspektivische Verschiebung für die Parallaxe-Sequenzen.....	68
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>70</b>
6.1	Zusammenfassung für die Erstellung der stereoskopischen Sequenzen...	70
6.2	Erkenntnisse aus der Versuchsdurchführung .....	71
6.2.1	Vorteile im Bezug auf S3D-Produktion .....	71
6.2.2	Nachteil im Bezug auf S3D-Produktion .....	71
6.2.3	Möglichkeit für die Erstellung strukturbetaffeter Computermodelle.....	72
6.3	Möglichkeiten und visuelle Effekte für die Postproduktion .....	72
6.3.1	Neuausrichtung des Fokus und Schärfentiefenausdehnung ....	72
6.3.2	Rendern in z-Richtung .....	73
6.3.3	Free View Point.....	73
6.4	Ausblick .....	74
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>XI</b>
<b>Anlagen.....</b>		<b>XIV</b>
<b>Eigenständigkeitserklärung .....</b>		<b>XX</b>

## Abkürzungsverzeichnis

AVI ...Audio Video Interleave

JPEG ...Joint Photographic Experts Group

JPS ...JPEG stereoscopic

PNG ...Portable Network Graphics

S3D ...Stereo 3D

SMM ...Stereo Movie Maker

SPM ...Stereo Photo Maker

TIFF ...Tagged Image File Format



## Formelverzeichnis

Plenoptische Funktion

$$L7(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$$

Reduzierte plenoptische Funktion

$$L4(x, y, u, v)$$

Verhältnisgleichung zur Ausrichtung von Hauptlinse und Mikrolinsen

$$\frac{D}{b} = \frac{D'}{b'}$$

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des menschlichen Auges.....	2
Abbildung 2: Aufbau der Retina.....	3
Abbildung 3: Veränderung der Linsendicke bei der Akkommodation, Links: nahes Objekt und dicke Linse, Rechts: fernes Objekt und dünne Linse .....	4
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen der Konvergenz und der Scheinfensterebene	9
Abbildung 5: Zusammenhang zwischen der Parallaxe und der Scheinfensterebene ...	11
Abbildung 6: Darstellung für den Horopter und den Panumraum.....	12
Abbildung 7: Spiegel-Rig und Side-by-Side-Rig und deren Abbildung entlang der optischen Achse .....	17
Abbildung 8: verschiedene Anaglyphenverfahren und deren Tiefenwirkung.....	19
Abbildung 9: linear und zirkular polarisiertes Licht.....	21
Abbildung 10: Funktionsprinzip Linsenrasterverfahren und Parallaxenbarrier .....	22
Abbildung 11: Links: Visualisierung der plenoptischen Funktion. Rechts: Punktpaare zwischen zwei Ebenen im Raum .....	24
Abbildung 12: Abbildungsprinzip einer Lichtfeldkamera.....	25
Abbildung 13: Abbildung der aufgenommenen Szene auf dem Sensor einer Lichtfeldkamera. Links: Verhältnis zw. Objektivlinse und Mikrolinsen ist zu groß. Mitte: Verhältnis zw. Objektivlinse und Mikrolinsen ist abgestimmt. Rechts: Verhältnis zw. Objektivlinse und Mikrolinse ist zu klein .....	27
Abbildung 14: Parametrisierung des Lichtfeldes, das in eine Kamera trifft .....	29
Abbildung 15: Die Summe aller Strahlen, die in die Kamera treffen.....	29
Abbildung 16: Der Strahlenkegel, der einen Pixel in einer Fotografie bildet.....	30
Abbildung 17: Abtastung des aufgenommenen Lichtfeldes einer plenoptischen Kamera .....	31
Abbildung 18: Aufbau einer Lichtfeldkamera und die optische Abbildung durch die Hauptlinse .....	33
Abbildung 19: Das Rohbild auf dem Fotosensor einer Lichtfeldkamera und vergrößerte Bildausschnitte .....	34
Abbildung 20: Teilbilder einer Lichtfeldaufnahme und vergrößerte Bildausschnitte .....	35
Abbildung 21: Aufbau einer Lichtfeldkamera und die optische Abbildung durch das Mikrolinsengitter .....	36
Abbildung 22: Änderung des Strahlen-Raum-Diagramms, bei der Änderung des Fokus, .....	37
Abbildung 23: Übersicht der Verarbeitung eines Lichtfeldes.....	39
Abbildung 24: vergrößerte Ansicht einer Lichtfeldaufnahme mit veränderten Fokuseinstellungen, Links: wie Aufnahme, Mitte: Refokussiert auf Hintergrund, Rechts: erweiterte Schärfentiefe bei der Hintergrund und Vordergrund scharf abgebildet sind. ....	40
Abbildung 25: Links: Lichtkegel in einer Lochkamera, Mitte: Lichtkegel in zwei Lochkameras, Rechts: Bild, das durch ein Linsensystem entsteht.....	41
Abbildung 26: Prinzip für Stereo über eine Linse, aufgenommenes Objekt mit Leuchtdichteprofil, a) Objekt im Fokus, b) Objekt ist näher, c) Objekt ist weiter weg, d) e) f) bei exzentrischer Blende .....	42

Abbildung 27: eine Lichtfeldaufnahme bei der die Perspektive verschoben wurde. Die Eckpunkte der Markierung zeigen korrespondierende Punkte in den einzelnen Bildern.	
.....	43
Abbildung 28: Lytro Illum .....	45
Abbildung 29: Ansicht der Assistentleiste nach Betätigung des Lytro-Buttons .....	47
Abbildung 30: Übersicht Lytro Desktop, 1) Menüleiste, 2) Ansichtsmöglichkeiten 3) Auswahl der Arbeitsbereiche .....	48
Abbildung 31: Einzelbild aus der Sequenz „Wolkenzug“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild .....	52
Abbildung 32: Einzelbild aus der Sequenz „Sonnenuntergang“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild .....	53
Abbildung 33: Einzelbild aus der Sequenz „Skulptur“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild .....	53
Abbildung 34: Einzelbild aus der Sequenz „Netzlampe“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild .....	54
Abbildung 35: Einzelbild aus der Sequenz „Treppengang“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild .....	55
Abbildung 36: Importieren der Rohdaten, Screenshot von Lytro Desktop .....	57
Abbildung 37: Screenshot der Exportmöglichkeiten in „Lytro Desktop“ .....	58
Abbildung 38: Screenshot Stereo Photo Maker- Einstellungen für die Stapelverarbeitung .....	59
Abbildung 39: Screenshot des Importfensters von After Effects .....	61
Abbildung 40: Screenshot von After Effects, 1) Positionseigenschaft des Null-Objekts mit aktivierter Stoppuhr 2) Auswahl der übergeordneten Ebene .....	63
Abbildung 41: Screenshot von Stereo Movie Maker, Import des linken und rechten Videos .....	64
Abbildung 42: Fensteransicht von Stereo Movie und die wichtigsten Steuerelemente, 1) Wiedergabeelemente, 2) Darstellungsverfahren, 3) Framekorrektur bei zeitlich versetzten Bildern, 4) Teilbildverschiebung .....	65
Abbildung 43: Fensteransicht von Lytro Desktop und die Fokusstreuung-Funktion .....	66
Abbildung 44: Fensteransicht von Lytro Desktop und die Blende der virtuellen Kamera .....	67
Abbildung 45: Perspektivische Verschiebung in Lytro Desktop .....	68

# 1 Einleitung

Mit der Lichtfeldtechnologie entwickelt sich derzeit eine neue Aufnahmetechnik im Bereich der Foto- und Videografie. Erstaunend ist, dass die Theorie und die Grundlagen der Lichtfelder bereits seit dem Anfang des 20. Jahrhunderts existieren. Das Prinzip wurde 1908 von dem französischen Physiker Gabriel Lippmann erstmals vorgestellt. Erst am Ende des 20. Jahrhunderts gelang es, auf der Grundlage dieser Technik die ersten Bilder aufzunehmen. Damals waren für die Umsetzung noch etwa 100 Kameras und mehrere Hochleistungsrechner notwendig, um die aufgenommenen Daten zu verarbeiten. Im Laufe der Zeit wurde der Ansatz von Lippmann von verschiedenen Wissenschaftlern weiterentwickelt. Die Lichtfeldtechnologie profitiert von dem enormen Fortschritt in der Rechenleistung und der kleiner werdenden Bauform leistungsfähiger Computertechnik. Die ersten Modelle wurden vor allem für industrielle Zwecke hergestellt. Mittlerweile ist bereits die zweite Generation von Lichtfeldkameras auf dem Markt.

Die folgende Arbeit untersucht die Möglichkeit der Erstellung von stereoskopischen Videos mit einer plenoptischen Handkamera am Beispiel der Lytro Illum. Dazu werden in den ersten Kapiteln die Grundlagen für die Stereoskopie und die Lichtfeldtechnologie erläutert. Darauf aufbauend wird im Anschluss für die gewählte Lichtfeldkamera ein Versuchsaufbau geplant und durchgeführt. Dabei soll untersucht werden, ob sich die Lichtfeldtechnologie als Aufnahmetechnik für die Stereoskopie eignet und welche Möglichkeiten sich im Allgemeinen für die Postproduktion ergeben. Das Ziel der Arbeit ist es, die Lichtfeldtechnologie als Aufnahmetechnik vorzustellen. Desweiteren werden die Möglichkeiten die sich für die Postproduktion ergeben gezeigt.

Um den Einsatz der Lichtfeldkamera zu testen, erfolgt in dieser Arbeit ein Versuch mit der Lytro Illum. Dabei handelt es sich um eine Lichtfeld-Handkamera, die in ihrer Haptik einer Spiegelreflexkamera gleicht. Aus diesem Grund, findet die Versuchsdurchführung nicht unter Laborbedingungen statt, sondern untersucht deren Einsatz unter realen Bedingungen.

## 2 Grundlagen und Kenngrößen für Stereo 3D

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen des menschlichen Sehens. Diese Grundlagen sind wichtig für das Verständnis von Stereo 3D (S3D), da bei der Stereoskopie das Sehen mit zwei Augen imitiert wird. Aus den Erkenntnissen über das menschliche Sehverhalten resultieren Kenngrößen und Prinzipien für S3D. Es ist zu beachten, dass der Sehprozess deutlich komplexer ist, als hier beschrieben. Ebenso treten die hier dokumentierten Mechanismen nicht einzeln auf, sondern sind ein Teil der umfangreichen menschlichen Wahrnehmung.

### 2.1 Der menschliche Sehprozess

#### 2.1.1 Aufbau und Funktionsweise des menschlichen Auges

Das Auge des Menschen bildet die Grundlage des Sehens und gibt uns die Möglichkeit unsere Umgebung zu erkennen und Objekte räumlich und zeitlich zuzuordnen. Die Abbildung 1 zeigt einen Querschnitt durch das Auge und die wichtigsten Bestandteile.

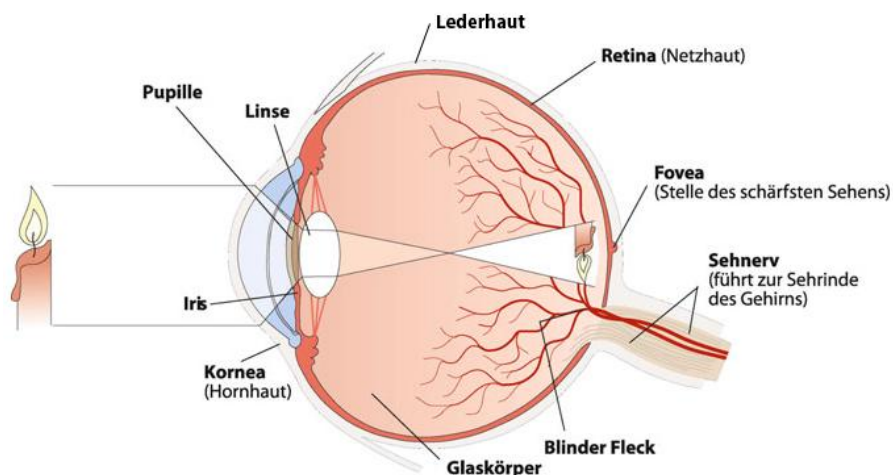


Abbildung 1: Aufbau des menschlichen Auges<sup>1</sup>

Die weiße Lederhaut bildet den Mantel des Augapfels. Die erste Stelle, auf die einfallendes Licht trifft, ist die transparente Hornhaut. Hier folgt die erste Bündelung des Lichts. Bevor das Licht seinen Weg durch die Linse nimmt, muss es die Pupille passieren. Sie wird durch die ringförmige Muskelstruktur der Iris gebildet. Die Iris reguliert

---

<sup>1</sup> Quelle: Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 54

durch Erweitern oder Zusammenziehen den Durchmesser der Pupille und damit die Menge des einfallenden Licht. Durch die Pupillenöffnung gelangt das Licht weiter ins Auge auf die Linse. Die Linse kann ihre Form durch die Ziliarmuskeln ändern und dadurch die Brechkraft beeinflussen. Das Licht wird durch die Linse gebrochen und somit auf dem Kopf stehend auf der Retina abgebildet. Nach der Linse passiert das Licht den Glaskörper und fällt auf die Retina, auch Netzhaut genannt.

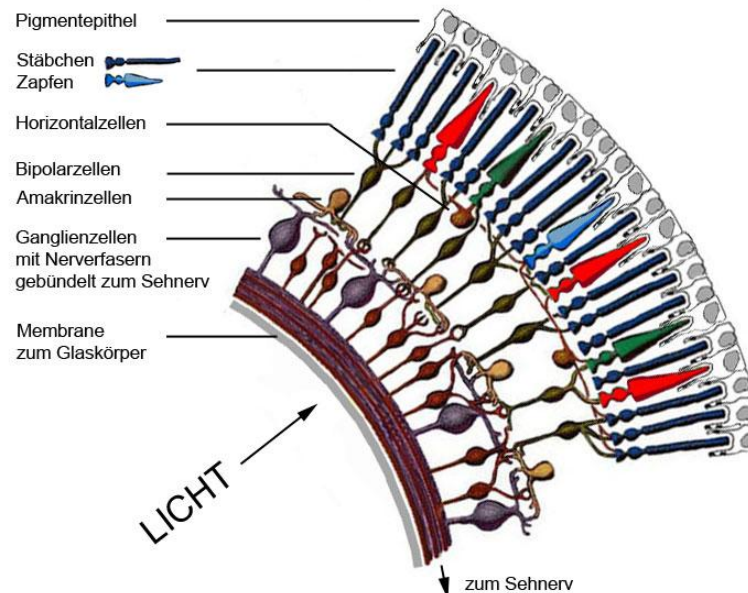


Abbildung 2: Aufbau der Retina<sup>2</sup>

Die Netzhaut besteht aus Rezeptoren und anderen Neuronenschichten wie den Ganglienzellen. Sie wandelt die Lichtenergie in ein bioelektrisches Signal um. Die Rezeptoren bestehen aus Zapfen und Stäbchen, die Verteilung der einzelnen Rezeptortypen ist auf der gesamten Netzhaut unterschiedlich. Die Zapfen sind Photorezeptoren, die weniger Lichtempfindlich und somit bei heller Umgebungsbeleuchtung zuständig sind. Sie sind für das Farbsehen verantwortlich. Die Dichte der Zapfen ist in der Fovea am höchsten. Die Fovea, auch gelber Fleck genannt, ist der Bereich des schärfsten Sehens. Die Stäbchen hingegen sind sehr lichtempfindlich und arbeiten bei geringer Helligkeit. Sie sind für das Hell-Dunkel-Sehen verantwortlich und können keine Farben wahrnehmen. Die bioelektrischen Signale der Rezeptoren werden an den Sehnerv weitergegeben und gelangen von dort an das Sehzentrum im Gehirn. An der Stelle des Sehnervs befindet sich der blinde Fleck. An dieser Stelle gibt es keine Photorezeptoren, da dort die Nervenfasern vom Gehirn und die Blutgefäße in das Auge eintreten.<sup>3 4</sup>

<sup>2</sup> Quelle: Funk, Gerhard: Auge und Farbwahrnehmung, 2012, <http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen%3AAllgemeine/module/16457?step=2> (Zugriff am 19.03.2015)

<sup>3</sup>Vgl. Frings, Stephan / Müller, Frank: Biologie der Sinne, Vom Molekül zur Wahrnehmung, 2014, S.124 ff.

## 2.1.2 Akkommodation

Die Augen müssen sich auf die gegebenen Verhältnisse der Umgebung einstellen, um die Umgebung scharf auf der Retina abzubilden. Eine Möglichkeit der Anpassung ist die Akkommodation. Die Akkommodation benennt den Mechanismus der Linse, die Dicke bzw. die Krümmung der Linse zu ändern. Damit geht eine Veränderung der Brennweite der Augen einher. Für das Erfassen weit entfernter Objekte benötigt es eine dünne Linse mit geringer Brechkraft. Im Gegensatz zu nah liegenden Objekten die eine dicke Linse und damit eine hohe Brechkraft erfordern. Die Verformung der Augenlinse wird durch den Ziliarmuskel hervorgerufen.<sup>5 6</sup>



Abbildung 3: Veränderung der Linsendicke bei der Akkommodation, Links: nahes Objekt und dicke Linse, Rechts: fernes Objekt und dünne Linse<sup>7</sup>

## 2.1.3 Vom Auge zum Gehirn

Die Informationen der über 120 Millionen Rezeptoren werden durch die etwa 1,2 Millionen Ganglienzellen zusammengefasst. Da die Zahl der Ganglienzellen deutlich kleiner ist, decken diese ein bestimmtes Feld von Rezeptoren ab. Diese Felder nennt man rezeptive Felder. Sie werden nach der Art ihrer Reaktion auf einfallendes Licht nach On- und Off-Ganglienzellen unterschieden. Generell besteht der Aufbau dieser Felder aus einem kreisförmigen Zentrum und einem darum liegenden Ring. On-Ganglienzellen reagieren besonders bei einem Reiz des inneren Bereichs. Fällt Licht auf den äußeren Bereich der On-Zellen, wird die Aktivität dieser reduziert. Bei Off-Ganglienzellen verhält es sich umgekehrt. Die Ganglienzellen reagieren also nur auf einen Reiz in einem bestimmten Bereich und nicht auf beide gleichzeitig. Die Arbeit der Ganglienzellen und deren rezeptive Felder können als eine Art der Komprimierung der

<sup>4</sup> Vgl. Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 54 ff.

<sup>5</sup> Vgl. Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.6 und S.26

<sup>6</sup> Vgl. Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 102

<sup>7</sup> Quelle: Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.7

visuellen Information verstanden werden. So werden beispielsweise Beleuchtungsunterschiede und Kontraste wahrgenommen und an die Sehnerven weitergeleitet.<sup>8</sup>

Das bioelektrische Signal verläuft dann weiter durch den Sehnerv bis hin zur Sehkreuzung. Dort werden die Fasern der Sehnerven beider Augen sortiert und weiter an die seitlichen Kniehöcker gegeben. Das heißt, dass die linken und rechten Sehfelder der Augen separiert werden. So gelangen die linken Sehfelder mit dem rechten seitlichen Kniehöcker und die rechten Sehfelder mit dem linken seitlichen Kniehöcker in das Sehzentrum. Das ermöglicht eine Auswertung der Unterschiede zwischen den Sehfeldern des linken und rechten Auges. Die visuellen Informationen der Augen werden im Sehzentrum verarbeitet und auf Strukturen, Linien, Kontraste und Bewegungen analysiert.<sup>9</sup>

## 2.1.4 Augenbewegung

Der Augapfel ist mit sechs Muskeln verbunden. Diese Muskeln halten die Augen an ihrer Position und sind gleichzeitig für die Bewegung des Auges zuständig. Die Augen sind ständig in Bewegung. Die Augenbewegungen werden in Augenfolgebewegung, Vergenzbewegung und Sakkaden unterschieden. Die Augenfolgebewegung findet bei der Fixierung bewegter Objekte statt und werden auch Versionsbewegungen genannt. Vergenzbewegungen beschreiben die Veränderung der Augenstellung zueinander, sie dienen der Fokussierung von Objekten. Sakkaden sind ruckartige Bewegungen um den Fixationspunkt, die beispielsweise beim Lesen auftreten. Somit wird der Bereich des schärfsten Sehens geringfügig verschoben. Die marginalen Ortsänderungen der Augen werden auch Inspektionsakkaden genannt. Außerdem gibt es noch die Zielsakkaden. Das sind gezielte Sprünge der Augen an einen anderen Ort der Umgebung. Während dieser Bewegung findet keine Informationsübertragung statt. Deutlich wird das, wenn man seine Augenbewegungen im Spiegel sehen will. Die Fixierung eines Punktes erfolgt nicht ausschließlich über die Bewegung der Augen, sondern ist häufig mit einer Kopfbewegung verbunden. Das hängt mit der Bemühung zusammen, den anvisierten Punkt stets in den Bereich der Fovea zu halten.<sup>10 11</sup>

---

<sup>8</sup> Vgl. Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 59

<sup>9</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.15 ff.

<sup>10</sup> Vgl. Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 93 f.

<sup>11</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.5 f.



## 2.2 Monokulare Tiefenwahrnehmung

Um zu verstehen, wie der Mensch seine dreidimensionale Umgebung erfasst, ist es notwendig zu wissen, wie der räumliche Eindruck zustande kommt. Auch bei der Betrachtung zweidimensionaler Bilder ist es möglich, den abgebildeten Raum zu erkennen. Das erfolgt durch die monokulare Tiefenwahrnehmung. Bei der Tiefenwahrnehmung mit einem Auge rekonstruiert das menschliche Gehirn den dreidimensionalen Raum. Die Rekonstruktion basiert dabei nicht auf angeborenen Methoden. Die Tiefenwahrnehmung bei der Betrachtung mit einem Auge entsteht durch erlernte Tiefenhinweise oder monokulare Tiefenkriterien. Diese Kriterien beschreiben die Einschätzung der Tiefe aus einem retinalen Bild. Aus der monokularen Tiefenwahrnehmung resultieren ebenso Mittel zur Gestaltung in Malerei, Fotografie und Videografie, um einen Raumeindruck in 2D zu übermitteln. Der Mensch greift dabei auf seine Erfahrungen und Erinnerungen zurück und kann dadurch den Raum in einem zweidimensionalen Bild assoziieren.<sup>12 13 14</sup>

### 2.2.1 Perspektive, Größe und Position

#### Linearperspektive

Durch das Wissen darüber, dass parallel verlaufende Linien in weiter Entfernung zu einem Fluchtpunkt konvergieren, wird die Nutzung der Perspektive deutlich. Beispiele dafür sind Bahngleise oder lange gerade Straßen. Die Tiefenwirkung ist umso größer, je mehr sich parallel verlaufende Linien in der Ferne annähern. Auch in geschlossenen Räumen geben uns Linien Aufschluss darüber, wie groß oder klein ein Raum ist. Die Auswertung oder Beurteilung geschieht dabei unterbewusst.<sup>15 16</sup>

#### Farb- und atmosphärische Perspektive

Durch die Beschaffenheit der Atmosphäre, also die Gase der Luft und die enthaltenen Partikel wie Wasser und Staub, kommt es zur Streuung des Lichts. Diese Streuung verursacht in weiter Entfernung weiche Kontraste, blasse Farben und eine farbliche Änderung ins Blaue oder Graue. Kräftige Farben und Kontraste werden als nah emp-

---

<sup>12</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.45

<sup>13</sup> Vgl. Frings, Stephan / Müller, Frank: Biologie der Sinne, Vom Molekül zur Wahrnehmung, 2014, S.296 f.

<sup>14</sup> Vgl. Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 98

<sup>15</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.45

<sup>16</sup> Vgl. Hemmo, Max: s3D now!, A Stereoscopic Experiment for Film and TV, Berlin 2012, S. 15

funden, hingegen werden weiche Kontraste und blasse Farben als fern wahrgenommen.<sup>17</sup>

### **relative Größe und gewohnte Größe**

Bei der Betrachtung von Objekten gleicher Größe erscheint das Objekt näher, das größer wahrgenommen wird. Aus der Erfahrung heraus werden weit entfernte Dinge als klein beobachtet. Dieses Prinzip funktioniert auch bei ungleichen Objekten, jedoch nur, wenn die Größenverhältnisse bekannt sind. Dazu greift das Gehirn auf alltägliche Dinge zurück und nutzt diese als Vergleichsmaßstab. Der am häufigsten genutzte Maßstab für die Tiefenschätzung ist der Mensch selbst, sobald er im Sichtfeld zu sehen ist.<sup>18</sup>

<sup>19</sup>

### **relative Höhe**

Um einen Tiefeneindruck zu bestimmen werden gleichzeitig mehrere Hinweise genutzt. Dabei wird der Raum stets nach einer Horizontallinie untersucht. Diese horizontalen Linien helfen dem visuellen System die Entfernung von Objekten einzuschätzen. Das beste Beispiel für die relative Höhe ist der Blick von einem Aussichtspunkt. Weit entfernte Objekte liegen näher am Horizont.<sup>20</sup>

## **2.2.2 Verdeckung und Überlappung**

Ein weiteres Kriterium zur Einschätzung der Lage eines Objektes im Raum ist die Verdeckung. Überschneiden sich mehrere Objekte, so können daraus Information über den Raum gewonnen werden. Somit ist es möglich zu erkennen, ob sich ein Objekt vor oder hinter einem anderen befindet. Der verdeckte Gegenstand liegt hinter dem verdeckenden Gegenstand. Durch Verdeckungen oder Überlappungen ist es jedoch nicht möglich Entfernungen wahrzunehmen. Das gelingt nur durch die Kombination mehrerer Tiefenhinweise.<sup>21</sup>

## **2.2.3 Licht und Schatten**

Das Zusammenspiel von Licht und Schatten ermöglicht es dem Menschen, sich im Raum zu orientieren. Der sogenannte Schlagschatten hilft dabei das räumliche Ver-

---

<sup>17</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.48 f.

<sup>18</sup> Vgl. Hagedorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 98

<sup>19</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.45

<sup>20</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.46

<sup>21</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.46

hältnis zwischen einem Objekt und seiner Umgebung zu erkennen. Je nachdem, wie ein Schlagschatten auf andere Objekte oder dem Untergrund fällt, ist es möglich, die Entfernung von Objekten zueinander einzuschätzen. Abhängig von Licht und Schatten ist unser Gehirn in der Lage, Vertiefungen und Wölbungen im Raum zu identifizieren. Die sogenannten Eigenschatten ermöglichen das Erkennen von Formen und Strukturen.<sup>22 23</sup>

### **Texturgradient**

Einen weiteren Tiefenhinweis bildet das Erkennen von Texturen. Texturen sind wahrnehmbare Oberflächen, die zur Charakterisierung von Objekten oder Elementen dienen. Der Texturgradient beschreibt dabei das Wissen darüber, dass sich die Abstände von Strukturen in der Ferne verkleinern. So ist der Mensch in der Lage, Gegenstände im Raum und Oberflächen zu erkennen. Besonders wichtig ist das bei der Betrachtung von Bodentexturen, um deren Beschaffenheit zu erkennen und die nahe Umgebung einzuordnen.<sup>24 25</sup>

## **2.3 Binokulare Tiefenwahrnehmung**

Binokulares Sehen beschreibt den Sehvorgang mit zwei Augen. Die Informationen der beiden Augen ermöglichen dem Gehirn eine feinere Auswertung der Tiefe unserer Umgebung. Außerdem bildet die Binokulare Tiefenwahrnehmung die Grundlagen für die Stereoskopie. Aus den Erkenntnissen der binokularen Tiefenwahrnehmung lassen sich Prinzipien und Gestaltungsmittel für die S3D-Produktion ableiten.

### **2.3.1 Vergenzen und Scheinfensterenebene**

Eine weitere Möglichkeit der Anpassung an eine beobachtete Situation erfolgt durch die sogenannten Vergenzbewegungen. Die Vergenzen bezeichnen die Fähigkeit der Augen, nach innen oder nach außen zu schwenken. Mit anderen Worten ist damit die Bewegung der Augen in entgegengesetzte Richtungen und somit die Anpassung der Augenstellung gemeint. Diese Fähigkeit dient dazu, Objekte zu fokussieren. Dabei wird zwischen der Konvergenz- und Divergenzbewegung unterschieden. Auch für die Stereoskopie sind Vergenzen von Bedeutung, da sich Kameras ebenso ausrichten lassen. Die Konvergenz beschreibt eine Bewegung der Augen aufeinander zu. Diese Fähigkeit

---

<sup>22</sup> Vgl. Hemmo, Max: s3D now!, A Stereoscopic Experiment for Film and TV, Berlin 2012, S. 16

<sup>23</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.46

<sup>24</sup> Vgl. Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 28

<sup>25</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.50

ist besonders für den Nahbereich von Bedeutung. Der Schnittpunkt der beiden Sehachsen wird als Konvergenzpunkt oder auch Fixationspunkt bezeichnet. Dieser rückt mit zunehmender Nähe eines Objektes immer näher. Besonders deutlich wird das, wenn man seinen Zeigefinger fixiert und diesen näher an die Augen führt. Je näher ein Objekt ist, desto mehr konvergieren die Augen. In der Stereoskopie sind Objekte, die im Konvergenzpunkt liegen, deckungsgleich und werden somit genau auf der physikalischen Bildebene, also auf dem Monitor oder der Leinwand, dargestellt. Diese Ebene wird als Scheinfenstersebene oder Nullebene bezeichnet. Die Scheinfenstersebene definiert, was bei der Betrachtung der stereoskopischen Bilder auf, vor oder hinter der Leinwand wahrgenommen wird. Eine Divergenzbewegung, also ein auseinander schießen der Augen, kommt beim natürlichen Sehen in der Regel nicht vor und hat daher auch bei der Stereoskopie keine Bedeutung.<sup>26 27</sup>

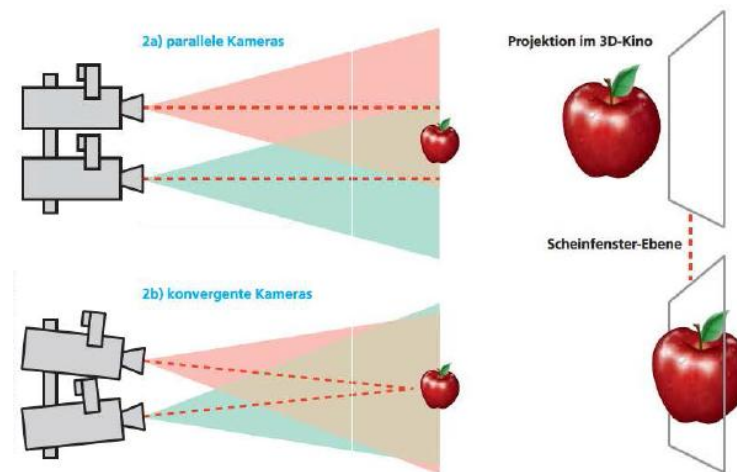


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen der Konvergenz und der Scheinfenstersebene<sup>28</sup>

### 2.3.2 Die Parallaxe / Disparität

Per Definition ist die Disparität „der Unterschied zwischen den Abbildern eines dreidimensionalen Objekts auf der linken und rechten Retina“. <sup>29</sup> Der durchschnittliche Augenabstand liegt bei 6,5 cm und wird in der Stereoskopie als Stereo-Basis bezeichnet. Im stereoskopischen Filmemachen definiert die Parallaxe die seitliche Verschiebung der beiden genutzten Stereobilder zueinander. <sup>30</sup>

<sup>26</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.31, S.360 ff.

<sup>27</sup> Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.11

<sup>28</sup> Quelle: Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.11

<sup>29</sup> Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 98

<sup>30</sup> Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.10

Das stereoskopische Sehen basiert auf den jeweiligen Teilbildern des linken und des rechten Auges. Jedes Auge fixiert ein Objekt aus einem leicht unterschiedlichen Blickwinkel. Somit hat jedes Auge eine eigene Sehachse. Der Unterschied der beiden Sehachsen wird als Parallaxe oder auch als Disparität bezeichnet. Diese Differenz ist messbar und beschreibt den Parallaxenwinkel.<sup>31</sup> Um sich die Parallaxe vorstellen zu können, gibt es ein einfaches Experiment. Halten Sie dazu ihren Zeigefinger in einem Abstand von etwa 20 cm vor Ihre Nasenspitze. Betrachten Sie nun abwechseln mit einem Auge die Umgebung hinter dem Zeigefinger. Der Finger wird bei dieser Betrachtung nach links und rechts springen.<sup>32</sup>

Objekte, die sich im Konvergenzpunkt, also im Schnittpunkt der Blicklinien zweier Kameras liegen, befinden sich auf der sogenannten Scheinfenster-Ebene. Als negative Parallaxe bezeichnet man den Bereich, der bei gleichbleibender Konvergenz zwischen Konvergenzpunkt und Kamera liegt. Objekte, die in diesen Bereich liegen, kommen aus der Scheinfenster-Ebene heraus und geben dem Betrachter das Gefühl, dass Objekte aus dem Monitor hervortreten. Wie weit ein Objekt aus der Scheinfenster-Ebene heraustreten darf hängt von der Projektionsgröße ab, da die Augen nur begrenzt konvergieren können. Die positive Parallaxe beschreibt den Bereich hinter dem Konvergenzpunkt, sofern dieser unverändert bleibt. Objekte in diesem Bereich rücken perspektivisch hinter die Scheinfenster-Ebene. Die positive Parallaxe darf bei stereoskopischen Aufnahmen nur bis zur Parallelstellung der Sehachsen erfolgen. Eine extreme Divergenz beider Augen kann zu körperlichen Beschwerden wie Kopfschmerzen, Schwindelgefühl oder Übelkeit führen.<sup>33</sup>

---

<sup>31</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.21

<sup>32</sup> Vgl. Ditzinger, Thomas: Illusion des Sehens, Eine Reise in die Welt der Visuellen Wahrnehmung, 2. überarbeitete Auflage, 2013, S.149 f.

<sup>33</sup> Vgl. Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.11 f.

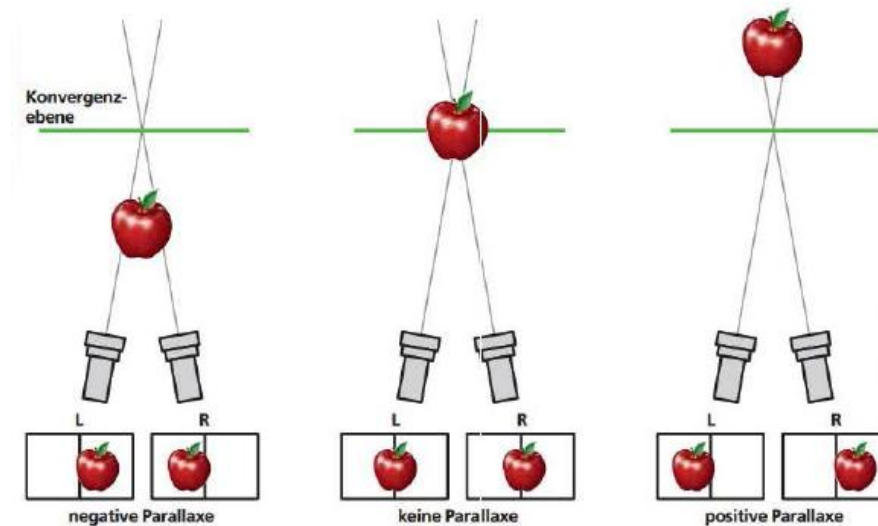


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen der Parallaxe und der Scheinfenster Ebene<sup>34</sup>

### 2.3.3 Stereobasis, Hyperstereo und Hypostereo

Ein weiteres Mittel, Einfluss auf die Gestaltung bei Stereo 3D zu nehmen, ist die Änderung der Stereobasis, auch als interaxialer Abstand bekannt. Die Stereobasis beschreibt den Abstand der optischen Achsen beider Objektive. Der durchschnittliche Augenabstand liegt bei 65 mm, das wird in der Stereoskopie auch als Ortho-Stereo bezeichnet und wird für einen räumlichen Eindruck bis etwa 20 m verwendet. Durch die Vergrößerung oder die Verkleinerung des interaxialen Abstandes lässt sich die Tiefenabbildung bestimmter Umgebungen steuern. Eine Anwendungsbeispiel sind weite Landschaftsaufnahmen. Werden diese mit der durchschnittlichen Stereobasis vom 65 mm aufgezeichnet, so sind die stereoskopischen Abbilder nahezu identisch und der 3D-Effekt damit sehr gering. Vergrößert sich die Stereobasis, vergrößert sich auch der bildliche Unterschied des abgebildeten Raums. Infolge dessen nimmt auch der 3D-Effekt wieder zu. Eine Vergrößerung des interaxialen Abstandes wird auch als Hyperstereo bezeichnet. Eine Verkleinerung der Stereobasis wird bei nahen Motiven oder Detailaufnahmen verwendet und wird als hypostereoskopisch bezeichnet.<sup>35 36 37</sup>

<sup>34</sup> Quelle: Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.12

<sup>35</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.349 ff.

<sup>36</sup> Vgl. Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.14

<sup>37</sup> Vgl. Michel, Benoit: Digital Stereoscopy, Scene to Screen 3D Production Workflow, Sprimont, Belgien, 2013, S.48 ff.

### 2.3.4 Horopter und Panumraum

Der Horopter ist eine imaginäre und leicht gewölbte Linie, die an einem fixierten Punkt im Raum vor den menschlichen Augen liegt. In diesem Fixationspunkt trifft das einfallende Licht auf identische Stellen der beiden Netzhäute. Ebenso werden die Punkte links und rechts neben dem Fixationspunkt auf korrespondierende Netzhautstellen projiziert. Die Wölbung dieser Linie entsteht durch die gebogenen Netzhäute. An den Punkten der Horopterlinie tritt keine Disparität auf, das fixierte Objekt wird also deckungsgleich abgebildet. Da die Augen immer bestrebt sind ein Objekt im Bereich des schärfsten Sehens zu fixieren, bildet sich für jedes neufixierte Objekt eine neue Horopterlinie. Der Bereich vor und hinter dem Horopter wird Panumraum genannt. Objekte oder Punkte, die in diesem Panumraum liegen, treffen nicht auf identische Stellen der Netzhäute, sondern haben einen Versatz. Die Fusionierung der beiden Teilbilder ist im Panumraum problemlos möglich. Befindet sich ein Objekt außerhalb des Panumraums, kommt es zum Doppelsehen. Die disparaten Punkte in diesem Bereich werden bei der Fusionierung der beiden Teilbilder unterdrückt. Anders als beim natürlichen Sehen kommt es beim stereoskopischen Bewegtbild nicht zu einer ständigen Verschiebung der Scheinfensterebene.<sup>38 39</sup>

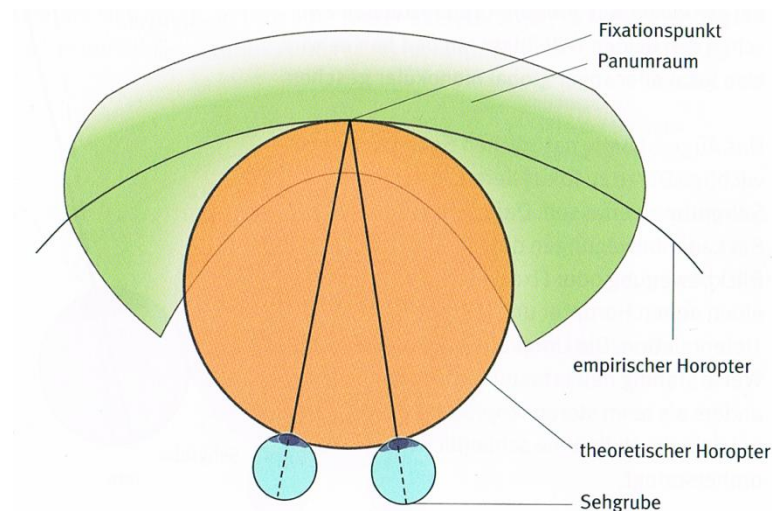


Abbildung 6: Darstellung für den Horopter und den Panumraum<sup>40</sup>

<sup>38</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.57 ff.

<sup>39</sup> Vgl. Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, 2011, S. 103

<sup>40</sup> Quelle: Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S. 58

### 2.3.5 Fusion, binokulare Summation und Stereopsis

Beim Sehen mit zwei Augen werden die einzelnen Teilbilder durch das Gehirn zu einem mittig liegenden zyklischen Bild fusioniert. Dabei verschmelzen nicht nur disparate Punkte, sondern auch deckungsgleiche Punkte. Die binokulare Summation beschreibt den Mechanismus des Gehirns, die Unterschiede der Teilbilder zu analysieren. Die Unterschiede der zusammengehörigen Punkte, wie Farbe und Helligkeit, werden summiert. Dabei entsteht ein Mittelwert der beiden Teilbilder - sowohl für die Helligkeit als auch für die Farbe. Auch die perspektivischen Unterschiede der Augen werden zu einem Gesamtbild verrechnet. Der horizontale Versatz korrespondierender Punkte auf der Netzhaut wird verglichen und ausgewertet. Diese Funktion nennt man Stereopsis. So erlangt das Gehirn Informationen über die räumliche Tiefe und ermöglicht die Abschätzung des Abstandes zwischen Objekten.<sup>41</sup>

## 2.4 Technische Voraussetzung für sauberes S3D

Bei der Betrachtung von stereoskopischen Videos können Störungen hervorgerufen werden, die beim natürlichen Sehen nicht entstehen. Das liegt daran, dass Bilder anders wahrgenommen werden als die Realität. Gerade bei Stereo 3D können Störeffekte entstehen die bereits bei der Aufnahme zustande kommen oder bei der Bearbeitung hervorgerufen werden. Kommt es zu solchen Störungen, kann die Wahrnehmung solcher Bilder unangenehm oder sogar schmerzhaft sein. Um Störeffekte zu minimieren oder zu vermeiden, gibt es technische Voraussetzungen, die eingehalten werden müssen.

### 2.4.1 Störeffekte

Störeffekte treten auf wenn es Unterschiede in den beiden Teilbildern gibt. Die meisten Unterschiede werden durch Differenzen in der Farbe, im Kontrast, in der Helligkeit und der geometrischen Ausrichtung hervorgerufen. Helligkeitsunterschiede in den Teilbildern können bis zu einem gewissen Grad durch die binokulare Summation kompensieren werden. Sind die Differenzen in der Helligkeit zu gravierend können sie nicht mehr ausgeglichen werden. Ebenso verhält es sich bei Farbunterschieden zwischen den Teilbildern. Kontrastunterschiede können in den Teilbildern durch Filter oder unterschiedliche Kameraeinstellung entstehen. Enthalten Stereo 3D wesentliche Unterschiede in Farbe, Helligkeit und Kontrast, kann die Wahrnehmung sehr schnell ermüden und das Sehen strengt den Zuschauer stark an. Um solchen Fehlern entgegen zu wirken, empfiehlt es sich, das entstehende 3D-Bild auf einem 3D-Monitor zu

---

<sup>41</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.55 ff



überprüfen. Für ein messtechnisch genaues Arbeiten bietet es sich an, die Kamerasignale zu vergleichen, beispielsweise über eine Vektorskop-Anzeige. Besonders wichtig ist der Abgleich bei Spiegelrigs, da Differenzen in den Teilbildern durch den verwendeten Spiegel (Reflexion, Absorption) entstehen. Kleinere Bildunterschiede können auch bei der Postproduktion angepasst werden.<sup>42</sup>

## 2.4.2 Unschärfeartefakte

Ein Schärferversatz in stereoskopischen Bildern fällt bei der Summation der Teilbilder weniger auf. Stereoskopische Bilder mit identischen Teilbildern wirken durch die doppelte Menge der Bildinformation stets schärfer. Ein Schärferversatz entsteht bereits bei der Aufnahme, wenn der Fokus einer Kamera vor oder hinter dem Objekt liegt. Wird mit einer hohen Schärfentiefe gearbeitet entstehen kaum sichtbare Nachteile, da die beiden Schärfentiefebereiche der zwei Kameras bei einem minimalen Versatz überlappen. Anders sieht es bei Motiven aus die mit einer geringen Schärfentiefe aufgenommen werden, da die Schärfentiefebereiche exakt übereinstimmen müssen. Ansonsten entsteht bei der Summation der Teilbilder ein unscharfes Bild.

## 2.4.3 Technische Voraussetzungen

Für eine saubere Aufnahme von Stereo 3D müssen die beiden genutzten optischen Systeme aneinander angepasst sein. Die Grundvoraussetzung ist dabei, dass die Kameras und Objektive identisch sind. Vor jeder Aufzeichnung müssen videotechnische und geometrische Faktoren geprüft und sichergestellt werden.

### geometrische Faktoren

Bei der Arbeit mit zwei Kameras kann es beim Aufbau dieser zu Fehlern kommen. Diese Fehler entstehen, wenn ein Stereosystem ungenau ausgerichtet ist. Auch Fertigungstoleranzen in optischen Elementen oder Kameras können zu Bildfehlern beitragen. Die beste Vorgehensweise, die Kameras genau auszurichten ist, eine Kamera als Referenzobjekt zu nehmen. Wichtig ist, dass kein Höhenversatz zwischen den beiden Teilbildern entsteht. Eine vertikale Verschiebung kann die stereoskopische Wahrnehmung bei der Betrachtung des Videomaterials beeinträchtigen oder gar unmöglich machen. Ebenso können Rotationsunterschiede einen Einfluss auf den 3D-Eindruck nehmen. Folglich ist bereits bei der Montage der beiden Kameras darauf zu achten, dass diese entsprechend genau ausgerichtet werden. Fakt ist, dass sich Fehler

---

<sup>42</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.90 ff.

in der geometrischen Ausrichtung kaum ausschließen lassen, allerdings fallen geringfügige Unterschiede nicht auf.

### **videotechnische Faktoren**

Es ist darauf zu achten, dass der Bildwechsel der Kamerasysteme gekoppelt und somit eine zeitgleiche Aufnahme möglich ist. Auch bei der Einstellung der Kameras gibt es wichtige Faktoren. So müssen die beiden Kameras hinsichtlich der Helligkeit und der Farbe angeglichen werden. Zwischen den einzelnen Teilbildern dürfen keine Größenunterschiede bestehen, da der Mensch sonst nicht in der Lage ist diese zu fusionieren. Das spielt vor allem bei Zoomobjektiven eine Rolle, da Objekte bei unterschiedlichen Brennweiten unterschiedlich groß dargestellt werden. Aber auch bei Festbrennweiten können durch die Toleranzen bei der Herstellung, Unterschiede auftreten. Ziel ist es, dass die beiden Kameras unter den gleichen Einstellungen aufnehmen. Es müssen also auch die Auflösungen und die Bildwiederholungsfrequenz exakt gleich sein.<sup>43 44</sup>

## **2.5 Aufnahmeverfahren in der Stereoskopie**

Es gibt verschiedene Aufnahmeverfahren, die sich für die Stereoskopie durchgesetzt haben. In diesem Abschnitt werden die bedeutendsten Verfahren erläutert. Es ist zu beachten, dass es nicht die eine universelle Aufnahmetechnik gibt, da jedes System sowohl Vorteile als auch Nachteile hat.

### **2.5.1 Side-by-Side**

Bei Aufnahmen, die mit einem Side-by-Side-Rig umgesetzt werden, liegen zwei Kameras parallel zueinander auf einer Vorrichtung. Diese Vorrichtung enthält eine Schiene, die eine seitliche Verschiebung der Kameras ermöglicht. Dadurch lässt sich der Abstand der optischen Systeme und somit die Stereobasis verändern. Der minimale Abstand hängt von der Beschaffenheit der verwendeten Kameras ab, also der Objektivgröße und der Größe des Kameragehäuses. Gerade mit hochwertiger Technik ist eine Stereobasis von 6,5 cm schwer bis gar nicht zu realisieren. Das hat zur Folge, dass bei nahen Einstellungen nicht der gewünschte 3D-Effekt erzeugt werden kann. Ein Unterschreiten des durchschnittlichen Augenabstandes von 6,5 cm ist daher nur mit kleineren Kamertypen umsetzbar. Die Side-by-Side-Rigs bieten außerdem die Möglichkeit, den Winkel der Kameras zueinander zu verändern. Das beeinflusst die

---

<sup>43</sup> Vgl. Mendiburu, Bernard: 3D Movie Making, Stereoscopic Digital Cinema from Script to Screen, Burlington, 2009, S.48 f.

<sup>44</sup> Vgl. Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.17

Konvergenz und infolge dessen die Scheinfenster-Ebene. Bei konvergenten Einstellungen ist zu beachten, dass trapezförmigen Verzerrung an den Bildrändern auftreten. Die Verwendung von Side-by-Side-Rigs ohne Konvergenzänderungen bietet sich bei der Aufnahme von entfernten Objekten und totalen Einstellungen an.<sup>45 46</sup>

Side-by-Side-Rigs decken ein großes Spektrum für die Produktion von S3D ab und finden sowohl Anwendung im Amateur- als auch im Profibereich. Der Grund ist, dass es zahlreiche Hersteller und Ausführungen für solche Rigs gibt. Einige Modelle sind motorisiert und ermöglichen eine parallele Steuerung der beiden Kameras. So lassen sich die Eigenschaften wie die Stereobasis, die Konvergenz, der Zoom, der Fokus und die Blende der gekoppelten Kameras zeitgleich ändern.<sup>47</sup>

### 2.5.2 Spiegel-Rig

Die Arbeit mit Spiegel-Rigs schafft die Voraussetzung für Aufnahmen mit einer sehr geringen Stereobasis. An solchen Rigs werden die Kameras nicht nebeneinander montiert, sondern in einem rechten Winkel zueinander angeordnet. Möglich wird das mit einem halbdurchlässigen Spiegel. Die Vielzahl von Herstellern dieser Spiegel-Rig Systeme gewährleisten die Arbeit mit verschiedenen großen Kameras. Dadurch kann auch hochwertige und entsprechend große Filmtechnik genutzt werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Kamerasysteme nicht nebeneinander angeordnet sind, gestatten diese Rig-Systeme Stereobasen bis zu null Zentimetern. Das liegt somit deutlich unter dem durchschnittlichen Augenabstand. Dieser Umstand erlaubt es, nahe Einstellungen und Detailaufnahmen einzurichten. Ebenso lässt sich ein Konvergieren der Kameras durchführen, um die gewünschte Scheinfenster-Ebene einstellen zu können. Auch für Spiegel-Rigs gibt es Vorrichtungen, die eine elektronische Steuerung der typischen S3D-Kenngrößen und Objektiveneinstellungen auch während der laufenden Aufnahmen zulassen. Der Nachteil dieser Rigs ist, dass der Spiegel einen Lichtverlust mit sich bringt, der bis zu zwei Blenden betragen kann. Das reflektierte Bild kann Farbabweichungen aufweisen, die vom Reflexionswinkel des Spiegels abhängen. Ebenso muss sichergestellt sein, dass der Spiegel keine Verschmutzungen oder Schäden aufweist. Außerdem ist zu beachten, dass ein Teilbild der Kameras unweigerlich spiegelverkehrt ist und für die Betrachtung wieder gespiegelt werden muss. Spiegel-Rig-Systeme sind

---

<sup>45</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.383 ff.

<sup>46</sup> Vgl. Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.20

<sup>47</sup> Vgl. Michel, Benoit: Digital Stereoscopy, Scene to Screen 3D Production Workflow, Sprimont, Belgien, 2013, S.79

universell einsetzbar, aber bringen aufgrund ihrer Beschaffenheit einen hohen Aufwand bei der Justierung mit sich.<sup>48 49</sup>

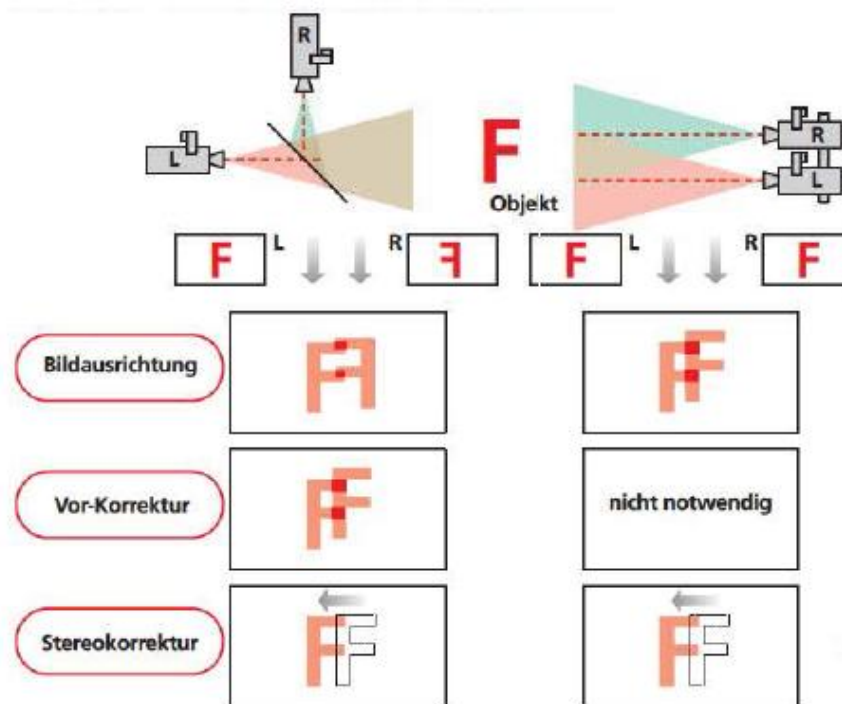


Abbildung 7: Spiegel-Rig und Side-by-Side-Rig und deren Abbildung entlang der optischen Achse<sup>50</sup>

### 2.5.3 Kompaktkameras

Die Stereo-3D-Kompaktkameras sind in einem kompakten Kameragehäuse verbaut. In diesem Gehäuse doppeln sich die zwei Objektive und die zwei Bildsensoren, die für die Erzeugung von S3D gebraucht werden. Für diese kompakte Bauform werden allerdings Kompromisse eingegangen. Beispielsweise kann bei den meisten Modellen kein bzw. nur ein geringer Einfluss auf die Stereobasis genommen werden. Die Konvergenz kann durch die seitliche Verschiebung der Bildsensoren zu den Objektiven erfolgen. Die häufigsten Kompaktsysteme werden mit einer festen Konvergenz ausgestattet. Die bautechnischen Einschränkungen wirken sich demnach auf die Einsatzmöglichkeiten und Tiefenwirkung aus. Kompaktkameras sind aufgrund der geringen Einstellmöglich-

<sup>48</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.390 ff.

<sup>49</sup> Vgl. Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.21

<sup>50</sup> Quelle: Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2/2011, S.22

keiten der Stereobasis und der Konvergenz nicht im professionellen Bereich anzusiedeln.<sup>51 52</sup>

## 2.6 Wiedergabemöglichkeiten in der Stereoskopie

Das generelle Prinzip zur Wiedergabe von stereoskopischem Material beruht darauf, dass jedem Auge das entsprechende Teilbild zugeführt wird. Dabei haben sich über die Zeit mehrere Methoden etabliert. Je nach Anwendung haben diese Methoden ihre Vor- und Nachteile. Um einen Tiefeneindruck zu erzielen ist es notwendig, dem betrachteten Bild Disparitäten hinzuzufügen, da diese für die Auswertung bei der binokularen Wahrnehmung eine große Rolle spielen. Das folgende Kapitel stellt die geläufigsten Wiedergabemöglichkeiten vor.

### 2.6.1 Anaglyphenverfahren

Die Bildtrennung beim Anaglyphenverfahren erfolgt durch die unterschiedliche Einfärbung der Teilbilder. Bei der Betrachtung solcher Bilder ist eine Brille mit entsprechenden Farbfolien erforderlich. Dabei ist das jeweilige, eingefärbte Teilbild nur durch den entsprechenden Farbfilter zu erkennen, die andere wird gefiltert. So werden die Teilbilder dem jeweiligen Auge zugeführt. Die verwendeten Farben und Farbfilter beruhen auf dem Prinzip der Komplementärfarben. Komplementärfarben sind Farben, die sich auf dem Farbkreis gegenüberliegen. Es gibt verschiedene Komplementärfarbenpaare, die ihre Anwendung in der Stereoskopie finden. Dazu zählen die Farbsysteme Blau-Gelb, Grün Magenta und das bekannteste Farbsystem Rot-Cyan (Rot-Blau). Die unterschiedlichen Farbsysteme erzeugen unterschiedliche Helligkeiten bei der Betrachtung von Anaglyphenbildern.

Anaglyphen werden nach echt, grau und farbig unterschieden. Bei den echten Anaglyphen werden die Farben rot und blau verwendet. Bei dieser Variante werden die Helligkeiten für jeden Bildpunkt aus den Graustufenbildern der einzelnen Teilbilder errechnet. Diese Bilder wirken sehr dunkel und können keine Farbe wiedergeben, da bei dieser Methode kein Grünkanal verwendet wird. Entsprechend stark ist bei diesem Verfahren die Einfärbung des gesamten Bildes. Allerdings ist der Raumeindruck sehr gut und es entstehen keine Geisterbilder. Geisterbilder entstehen wenn Bildinformation aus dem benachbarten Teilbild zu sehen sind. Das sind in der Regel undeutliche, transparente Bildstrukturen die ihren Ursprung in einer ungenauen Farbkanaltrennung

---

<sup>51</sup> Vgl. Michel, Benoit: Digital Stereoscopy, Scene to Screen 3D Production Workflow, Sprimont, Belgien, 2013, S.78

<sup>52</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.386 ff.

haben. Bei den sogenannten grauen Anaglyphen werden alle drei Primärfarben verwendet. Das linke Halbbild beinhaltet den Rot-Kanal. Im rechten Halbbild werden der grüne und blaue Kanal zusammengefasst. Das betrachtete Bild ist wesentlich heller im Vergleich zu den echten Anaglyphen. Für die Wiedergabe des Bildes werden nur die Graustufenbilder verwendet, dadurch ist eine Farbwiedergabe nicht möglich. Die farbigen Anaglyphen werden, ähnlich wie die grauen, zusammengesetzt, allerdings werden hier statt der Helligkeitswerte die Farbwerte für die Teilbilder genommen. Im rechten Teilbild werden wieder der grüne und blaue Kanal zusammengefasst. Damit die Entstehung von Geisterbildern minimiert wird, werden die Bilder etwas entsättigt.



Abbildung 8: verschiedene Anaglyphenverfahren und deren Tiefenwirkung<sup>53</sup>

Anaglyphen haben den Vorteil, dass sie auf vielen Medien abgebildet werden können. Es sind keine speziellen Bildschirme oder Projektoren notwendig. Ebenso kann dieses Verfahren für Druckerzeugnisse oder Fotos verwendet werden. Der Nachteil des Anaglyphenverfahrens besteht darin, dass es bei der Betrachtung der Bilder zu Farbverfälschungen kommt, die den Farbfiltern der Brille verschuldet sind. Dadurch kann auch

<sup>53</sup> Quelle: Wimmer, Peter: Vergleich von Anaglyphenverfahren, <http://bit.ly/1Dbmb9R>, (Zugriff am 09.04.2015 20:01 Uhr)

eine Glanzbildung entstehen, da die verwendeten Farben unterschiedliche Helligkeiten bewirken.<sup>54 55 56</sup>

## 2.6.2 Polarisationsverfahren

Für die Bildtrennung beim Polarisationsverfahren wird auf die Polarisierungseigenschaften des Lichts zurückgegriffen. Durch Polarisationsfilter, auch Polfilter genannt, ist es möglich, eine Schwingungsrichtung des Lichts passieren zu lassen und die anderen zu filtern. Dadurch breitet sich das Licht nach dem Verlassen des Filters, mit einer bestimmten Schwingungsrichtung aus. Es wird zwischen der lineareren und der zirkularen Polarisation unterschieden. Im Gegensatz zu der Anaglyphentechnik ist keine farbliche Trennung der Teilbilder nötig und somit die Farbwiedergabe ohne eine Farbverfälschung möglich.

Bei der linearen Polarisation werden die Teilbilder durch 90° versetzte Polfilter wiedergegeben. Damit das passende Teilbild das Auge erreicht wird bei der Betrachtung eine Brille benötigt, die dem gleichen Versatz der Projektoren oder des Monitors entspricht. In den meisten Fällen werden die Polfilter in einem V angeordnet. So ist die Polarisationsrichtung für das rechte Auge 45° und für das linke Auge 135°. Damit das Licht seine Polarisation behält und nicht bei der Reflexion an der Leinwand zerstreut, werden in Kinos polarisationserhaltende Leinwände verwendet. Das geschieht durch das Metallisieren der Leinwandoberfläche. Bei 3D-fähigen Monitoren werden die Teilbilder durch unterschiedlich polarisierte Pixel realisiert. Dabei werden die Teilbilder abwechselnd angezeigt. Für eine optimale Wahrnehmung müssen der Betrachter und das Wiedergabemedium im gleichen Winkel zueinander stehen, weil ansonsten Störbilder auftreten können.

---

<sup>54</sup> Vgl. Wimmer, Peter: Aufnahme und Wiedergabe stereoskopischer Videos im Anwendungsbereich der Telekooperation, Linz, 2004, S.44 ff.

<sup>55</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.150 ff.

<sup>56</sup> Vgl. Hauger, David: Anaglyphen, 2006, <http://bit.ly/1H0IBOB> (Zugriff am 13.04.2015)

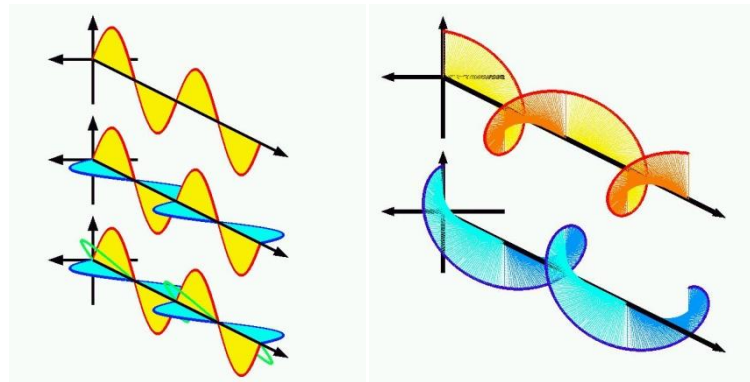


Abbildung 9: linear und zirkular polarisiertes Licht<sup>57</sup>

Um Störeffekte durch eine Kopfneigung des Betrachters zu vermeiden, können sogenannte zirkulare Polfilter verwendet werden. Dabei handelt es sich um einen lineare Polfilter und einen dahinter angebrachten Phasenschieber ( $\lambda/4$  Platte). Das Licht breitet sich mit einer schraubenförmigen Drehrichtung aus. Die Teilbildtrennung für die Augen erfolgt durch unterschiedliche Drehrichtungen des Phasenschiebers. Nachteil bei der zirkularen Polarisation ist der höhere Preis bei der Herstellung und eine Einschränkung der Darstellung bestimmter Wellenlängen im sichtbaren Spektrum. Generell geht beim Polarisationsverfahren ca. die Hälfte des Lichtes verloren und erfordert dadurch sehr lichtstarke Projektoren. Heute ist die Polarisations-technik, insbesondere die lineare, das Standardverfahren für Stereo 3D, da es wenige Bildstörungen mit sich bringt.<sup>58 59 60</sup>

### 2.6.3 Autostereoskopische Displays

Die Betrachtung von S3D über autostereoskopische Displays erfordert keine weiteren Hilfsmittel oder Brillen. Der derzeitige Entwicklungsstand dieser Geräte hat allerdings einen stark eingeschränkten Betrachtungsbereich und ist somit nur für wenige oder eine Person geeignet. Es gibt zwei verschiedene Funktionsweisen solcher Displays. Zum einen die Linsenrastermethode und zum anderen die Parallaxenbarriere. Die Halbbildtrennung wird bei beiden Verfahren direkt am Display realisiert. Bei der Linsenrastermethode ist eine Linsenrasterfolie angebracht. Die stereoskopischen Teilbilder werden für die Wiedergabe vertikal verschachtelt. Mit dieser spaltenweisen Verschachtelung geht eine Halbierung der horizontalen Auflösung einher. Durch das Linsenraster, das vor den Pixeln des Displays angebracht ist, wird das Licht der Bildpunkte leicht abgelenkt. Im optimalen Betrachtungsbereich sieht das jeweilige Auge nur die Pixelrei-

<sup>57</sup> Leipzig - Institut für Astrophysik Potsdam, Polarisiertes Licht, <http://bit.ly/1H3tpit>, (Zugriff am 14.04.2015)

<sup>58</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.157 f.

<sup>59</sup> Vgl. Wimmer, Peter: Aufnahme und Wiedergabe stereoskopischer Videos im Anwendungsbereich der Telekooperation, Linz, 2004, S.48 f.

<sup>60</sup> Vgl. Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik, Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotechnik in SD, HD, DI, 3D, 6. Auflage, Berlin, 2013, S. 517 f.



hen, die für es vorgesehen sind. Vergleichbar ist diese Technik mit der Betrachtung von „Wackelbildern“. Mit dem Unterschied, dass nicht zwei grundsätzlich verschiedene Bilder verwendet werden, sondern die beiden Teilbilder des 3D-Motivs.

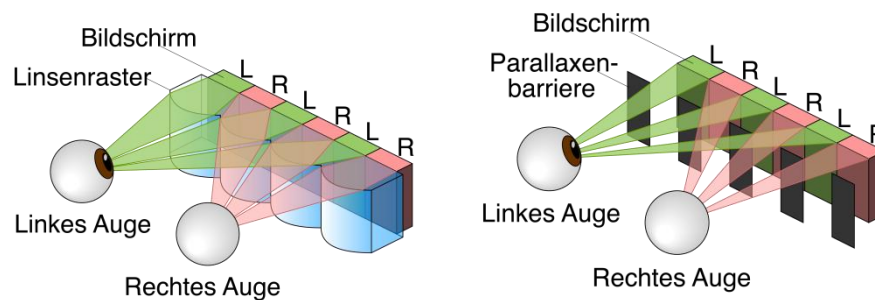


Abbildung 10: Funktionsprinzip Linsenrasterverfahren und Parallaxenbarriere<sup>61</sup>

Die Methode der Parallaxenbarriere nutzt ebenfalls ein vertikales Raster, das vor der Bildfläche des Monitors montiert ist. Die Halbbildtrennung entsteht durch das Blockieren des rechten Halbbildes für das linke Auge und umgekehrt. Die Parallaxenbarriere funktioniert über steuerbare Flüssigkristalle, die auch bei LCD-Displays verwendet werden, und ermöglicht somit ein An- und Ausschalten der 3D-Funktion. Um der beschränkten Betrachtungsposition entgegenwirken zu können, werden in modernen Geräten Trackingsysteme oder Multiview-Ansichten verwendet. Die Trackingsysteme verfolgen die Kopfbewegung des Zuschauers und richten daraufhin das Linsenraster neu aus. Für die Multiview-Ansichten werden 3D-Szenen aus mehreren Blickwinkeln aufgenommen und für die Autostereoskopie vertikal verschachtelt. Das setzt Displays mit einer sehr hohen Auflösung voraus, da diese Methode die horizontale Auflösung stark minimiert.<sup>62 63</sup>

<sup>61</sup> Quelle: Wikipedia, Autostereoskopie, [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Parallax\\_barrier\\_vs\\_lenticular\\_screen-de-01.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Parallax_barrier_vs_lenticular_screen-de-01.png), (Zugriff am 15.04.2015)

<sup>62</sup> Vgl. Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik, Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studiotechnik in SD, HD, DI, 3D, 6. Auflage, Berlin, 2013, S. 492 f.

<sup>63</sup> Vgl. Wimmer, Peter: Aufnahme und Wiedergabe stereoskopischer Videos im Anwendungsbereich der Telekooperation, Linz, 2004, S.54 f.

### 3 Grundlagen zur Lichtfeldkamera

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen der Lichtfeldtechnologie. Es beschreibt die plenoptische Funktion, die die mathematische Basis für die Lichtfeldtechnik bildet. Es folgt eine Erläuterung zu dem aufgenommenen Lichtfeld, das in einer herkömmlichen Kamera entsteht und zeigt die Unterschiede zum aufgenommenen Material einer Lichtfeldkamera. Aus den Informationen, die in einer plenoptischen Kamera entstehen, ergeben sich verschiedene Möglichkeiten zur Berechnung der endgültigen Bilder. Die Lichtfeldtechnologie eröffnet neue Möglichkeiten für die nachträgliche Einflussnahme auf entstandene Bilder. In dieser Arbeit werden die Prinzipien für die Bildgewinnung beschrieben, um die Möglichkeiten der neuen Technik in der Produktion zu erläutern. Auf mathematisch detaillierte Bildgleichungen wird dabei nicht eingegangen, diese können in der entsprechenden Fachliteratur nachgelesen werden.

#### 3.1 Das Lichtfeld und die plenoptische Funktion

Das Lichtfeld beschreibt die Menge des Lichtes, die an jedem Punkt im dreidimensionalen Raum in alle Richtungen fällt. Durch die plenoptische Funktion kann das Lichtfeld beschrieben werden. Außerdem lässt sich damit die menschliche Wahrnehmung idealisiert darstellen. Eine Charakterisierung aller bildbasierten Darstellungsverfahren erfolgt durch die Art und Weise, wie sie die plenoptische Funktion realisieren, also wie das Lichtfeld gespeichert und abgetastet wird.

In ihrem Ursprung ist diese Funktion eine siebendimensionale Funktion  $L7(x, y, z, \theta, \varphi, \lambda, t)$ . Die ist abhängig von den Raumkoordinaten  $(x, y, z)$ , der Zeit  $t$ , den Raumwinkeln  $(\theta, \varphi)$  und der Wellenlänge des Lichts  $\lambda$ . Durch die plenoptische Funktion lassen sich alle Strahlen in einem Raumbereich, mit Intensität und Wellenlänge, beschreiben. Die plenoptische Funktion hat in dieser Form aufgrund ihrer Komplexität in der Praxis keine Bedeutung, allerdings verhilft sie zu einem Verständnis der Lichtfeldkamera, der Computergrafik und der digitalen Bildverarbeitung. Das Speichern dieser Daten würde einen enormen Speicherplatz voraussetzen. Um die Menge des benötigten Speichers zu verringern, wird die plenoptische Funktion auf eine vierdimensionale Funktion vereinfacht und auf die notwendigen Bestandteile zur Erfassung des Lichtfeldes reduziert.

Zur Vereinfachung der Funktion wird davon ausgegangen, dass eine Szene statisch betrachtet wird und somit unabhängig von der Zeit  $t$  ist. Zur weiteren Vereinfachung für die Darstellung der Lichtfeldkamera wird die Wellenlänge des Lichts unterdrückt. Das Resultat ist eine fünfdimensionale Funktion  $L5(x, y, z, \theta, \varphi)$ .

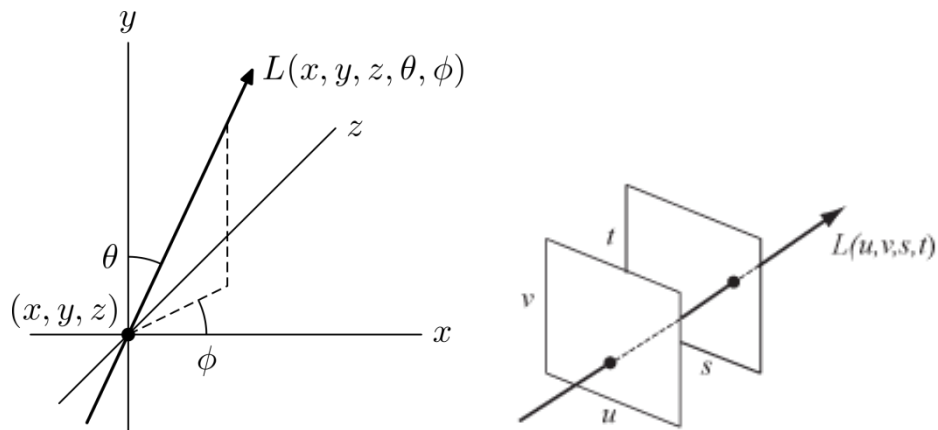


Abbildung 11: Links: Visualisierung der plenoptischen Funktion. Rechts: Punktpaare zwischen zwei Ebenen im Raum<sup>64</sup>

Um die plenoptische Funktion weiter zu vereinfachen wird davon ausgegangen, dass der Weg des Lichtstrahls nicht durch undurchsichtige Gegenstände oder andere Hindernisse beeinflusst wird und das Licht nur von den äußeren Punkten der Objekte abgestrahlt wird. Dadurch werden alle Punkte, die auf dem Strahl liegen, eindeutig zugeordnet. Durch diese Annahmen kann die plenoptische Funktion auf eine vierdimensionale Funktion  $L4(x, y, \theta, \phi)$  reduziert werden. Mit dieser Funktion ist es möglich, die Lichtstrahlen anhand ihrer Schnittpunkte  $(x, y)$  an einer zweidimensionalen Scheibe und der entstehenden Raumwinkel für Richtung zu beschreiben. Eine andere Herangehensweise ist die Beschreibung der Strahlen über die Schnittpunkte zweier paralleler Ebenen im Raum. Die resultierende Funktion ist dann nur noch von den Schnittpunkten abhängig und ergibt  $L4(x, y, u, v)$ . Zur Beschreibung der Lichtstrahlen in einer Lichtfeldkamera dienen die Blendenöffnung und das Mikrolinsenarray als Ebenen im Raum. Diese Methode wird als Zwei-Ebenen-Parametrierung bezeichnet.<sup>65 66 67 68</sup>

## 3.2 Funktionsweise der Lichtfeldaufnahmetechnik

Es gibt insgesamt drei verschiedene Methoden, das Lichtfeld der Umgebung aufzuzeichnen. Beispielsweise ist es möglich, mehrere identische Kameras gitterförmig anzuordnen. Äquivalent dazu kann das Aufnehmen des Lichtfeldes über ein Linsenarray erfolgen, das vor dem Objektiv angebracht ist. Diese Methode wurde u.a. von Georgiev durchgeführt. Die dritte Variante wird über ein Mikrolinsengitter realisiert, das vor dem

<sup>64</sup> Quelle: Levoy, Marc: Light Fields and Computational Imaging, Stanford, USA, 2006, S.47

<sup>65</sup> Vgl. Bomancz, Tycho: Lichtfelder und Linsen, Seminar Visual Computing, Stuttgart, 2011, [https://www.vis.uni-stuttgart.de/uploads/tx\\_visteaching/Lichtfelder-und-Linsen-Ausarbeitung\\_02.pdf](https://www.vis.uni-stuttgart.de/uploads/tx_visteaching/Lichtfelder-und-Linsen-Ausarbeitung_02.pdf), S.1

<sup>66</sup> Vgl. Schmid, Katrin: Animation mit bildbasierter Szenenrepräsentation, Weimar 2003, S.6 f.

<sup>67</sup> Vgl. Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S.349 f.

<sup>68</sup> Vgl. Jähne, Bernd: Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung, 7. Auflage, Springer Vieweg, 2012, S

Fotosensor angebracht ist, realisiert. Dieses Prinzip wird u.a. Ng für Lytro und von der Raytrix GmbH verwendet. Die Methode wird in dieser Arbeit näher beschrieben.<sup>69</sup>

### 3.2.1 Der prinzipielle Aufbau einer Lichtfeldkamera

In herkömmlichen Digitalkameras besteht der prinzipielle Aufbau aus einem Objektiv und dem lichtempfindlichen Bildsensor. Das Licht der Umgebung fällt in das Objektiv ein, wird dort gebrochen und weiter auf den Sensor geleitet. Das eingefallene Licht wird in seiner Intensität und Farbe von den einzelnen Bildpunkten aufgenommen. Das resultierende Bild ist eine zweidimensional Fotografie, in der jeder einzelne Pixel das gesamte eingefallene Licht repräsentiert.

Lichtfeldkameras sind in der Lage, einen Ausschnitt des 4D Lichtfeldes einer Szene in einem zweidimensionalen Bild aufzunehmen. Der prinzipielle Aufbau dieser Kameras ähnelt dem von herkömmlichen Digitalkameras. Der Unterschied besteht darin, dass sich vor dem Bildsensor ein Mikrolinsenarray oder auch Mikrolinsengitter befindet (siehe Abbildung 12). Das eintreffende Licht wird durch die Objektivlinse auf einen virtuellen Punkt hinter dem Bildsensor gebündelt. Die vor dem Sensor liegenden Mikrolinsen bilden jeweils einen Teil des gebündelten Lichts auf den Bildsensors ab. Dadurch wird ein Teilstück der Blendenöffnung des Objektivs nicht auf einen Bildpunkt des Sensors projiziert, sondern auf mehrere Sensorpunkte aufgeteilt. Im Gegensatz zu herkömmlichen Kameras bildet innerhalb der Lichtfeldkamera das Mikrolinsengitter die Bildebene und nicht der Sensor der Kamera.

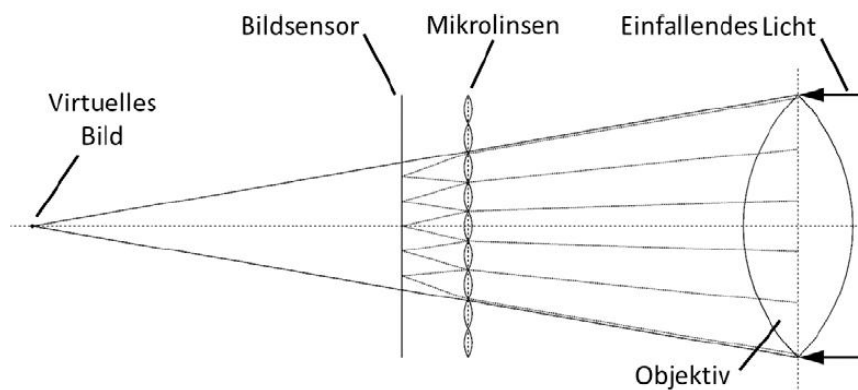


Abbildung 12: Abbildungsprinzip einer Lichtfeldkamera<sup>70</sup>

<sup>69</sup> Bomancz, Tycho: Lichtfelder und Linsen, Seminar Visual Computing, Stuttgart, 2011, [https://www.vis.uni-stuttgart.de/uploads/tx\\_visteaching/Lichtfelder-und-Linsen-Ausarbeitung\\_02.pdf](https://www.vis.uni-stuttgart.de/uploads/tx_visteaching/Lichtfelder-und-Linsen-Ausarbeitung_02.pdf), S.1

<sup>70</sup> Quelle: Perwaß, Christian / Wietzke, Lennart: Mikrolinsen – basierte 4D Lichtfeldkarten zur räumlichen Bilderfassung durch ein einziges Objektiv, Photonik, Ausgabe 06-2010, S.36

Das aufgenommene Bild einer Lichtfeldkamera speichert somit nicht nur das eintreffende Licht in seiner Intensität und Farbe, sondern lässt Rückschlüsse auf die Richtung des eintreffenden Lichts zu. Die Intensität des Lichts wird somit richtungsauflösend aufgenommen. Die räumlich abgetastete Auflösung hängt von der Größe der einzelnen Mikrolinsen ab. Aufgrund dieser Technik und der daraus resultierenden Möglichkeit der Strahlenverfolgung wird die Auflösung dieser Kameras in Megarays und nicht in Megapixeln angegeben.<sup>71</sup>

### 3.2.2 Ausrichtung der Mikrolinsen

Wie bereits erwähnt, bestimmt die Größe der Mikrolinsen die räumliche Auflösung des abgetasteten Lichtfeldes. Das bedeutet, dass die Mikrolinsen optimal ausgerichtet sein müssen, damit die Richtungsauflösung der Bilder maximal ist und das Bild, das auf der Hauptlinse der Kamera entsteht, so scharf und so groß wie möglich abgebildet wird. Die Maximierung der Schärfe erfordert die Fokussierung der Mikrolinsen auf die Blenden-ebene  $u$  der Hauptlinse. Das kann eine dynamische Veränderung der Entfernung zwischen dem Fotosensor und dem Mikrolinsengitter erforderlich machen, damit die Hauptlinse beim Fokussieren und Zoomen bewegt werden kann. Hierbei ist zu beachten, dass die Größe der Mikrolinsen im Verhältnis zu der Größe des Hauptlinsensystems verschwindend klein ist. Dadurch sind die Mikrolinsen bei optischer Unendlichkeit unabhängig von den Zoom- oder der Fokuseinstellungen des Hauptlinsensystems. Daraus resultiert ebenso ein fester Abstand zwischen dem Photosensor und den Mikrolinsen, der durch die Brennweite der Mikrolinsen bestimmt wird.

Die Richtungsauflösung hängt nicht nur von der Klarheit des Bildes unter den einzelnen Mikrolinsen ab, sondern auch von ihrer Größe. Ziel ist es, so viele Sensorpunkte wie möglich abzudecken. Ein nicht abgeglichenes System kann Überschneidungen oder Lücken zwischen den Sensorpunkten aufweisen. Um das zu vermeiden werden die relativen Größen der Hauptlinse und der Mikrolinsen so gewählt, dass die Bilder so groß wie möglich und ohne Überschneidungen abgebildet werden. Das erfolgt durch Abgleichen der verwendeten Blendenzahlen der Hauptlinse und der Mikrolinsen. Die Blendenzahl gibt das Verhältnis von der Brennweite zum Blendendurchmesser an. Die Brennweite ist das Ergebnis aus dem Kehrwert der Bildweite  $b$  addiert mit dem Kehrwert der Gegenstandsweite  $g$ .

---

<sup>71</sup> Vgl. Perwaß, Christian / Wietzke, Lennart: Mikrolinsen – basierte 4D Lichtfeldkarten zur räumlichen Bildfassung durch ein einziges Objektiv, Photonik, Ausgabe 06-2010, S.36 f.

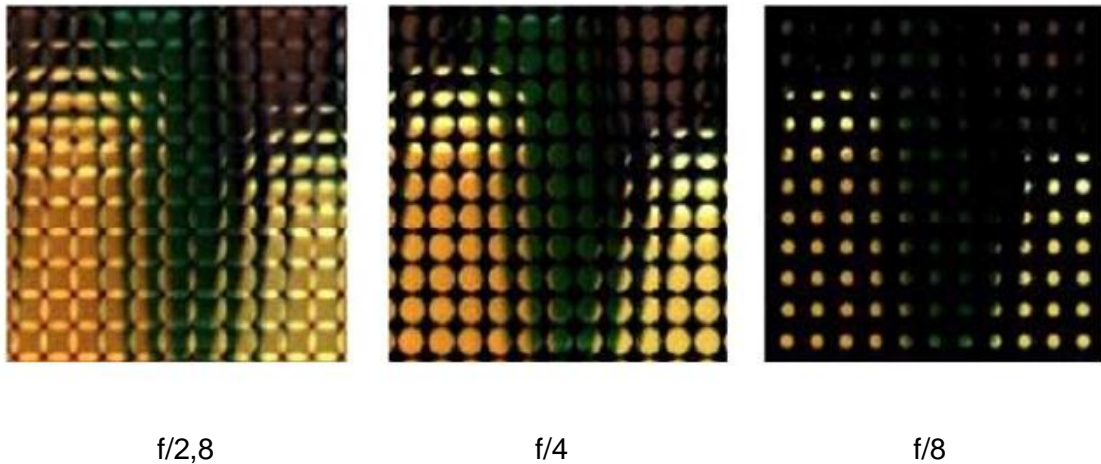


Abbildung 13: Abbildung der aufgenommenen Szene auf dem Sensor einer Lichtfeldkamera. Links: Verhältnis zw. Objektivlinse und Mikrolinsen ist zu groß. Mitte: Verhältnis zw. Objektivlinse und Mikrolinsen ist abgestimmt. Rechts: Verhältnis zw. Objektivlinse und Mikrolinse ist zu klein<sup>72</sup>

Voraussetzung für den Abgleich ist, dass das Objektiv ein scharfes Bild auf das Mikrolinsenarray wirft, welches wiederum ein scharfes Bild der Hauptlinse auf den Sensor gibt. Die Objektivlinse bildet die Szene auf das Mikrolinsenarray ab und hat sowohl eine bekannte Brennweite  $f$  und einen Linsendurchmesser  $D$ . Das Mikrolinsengitter besitzt zudem ebenfalls Linsen mit einer bekannten Brennweite  $f'$  und einen Linsendurchmesser  $D'$ . Da durch die Mikrolinsen die Abbildung auf dem Sensor überlappen oder sogar Lücken aufweisen kann, müssen die Objektivlinse und die Mikrolinsen optimal ausgelegt werden. Das ist der Fall, wenn: das Verhältnis des Linsendurchmessers  $D$  und der Bildweite  $b$  der Objektivlinse gleich dem Verhältnis des Linsendurchmessers  $D'$  und der Bildweite  $b'$  der Mikrolinse ist ( $\frac{D}{b} = \frac{D'}{b'}$ ). Die Abbildung 13 zeigt die Veränderung des Sichtfeldes der Mikrolinsenbilder auf dem Sensor im mikroskopischen Bereich, wenn die Blende des Hauptobjektives verkleinert, vergrößert oder abgeglichen wird. Die Blendenzahl der Mikrolinsen beträgt in diesem Beispiel den Wert  $f/4$ . Bei einer Blende  $f/4$  des Hauptlinsensystems ist das Sichtfeld der Mikrolinsen maximal ohne Überschneidungen. Wenn die Blendenzahl des Objektivs auf den Wert  $f/8$  verdoppelt wird, reduzieren sich die Bilder, die unterhalb der Mikrolinsen auf dem Sensor entstehen. Dadurch wird ein Großteil der Auflösung des Sensors verschwendet. Wenn die Blendenöffnung der Hauptlinse auf den Wert  $f/2,8$  geöffnet wird, überschneiden sich die Bilder, die auf den Sensor projiziert werden.<sup>73 74 75 76</sup>

<sup>72</sup> Quelle: Wehner, Andreas: Die plenoptische Kamera (Lichtfeldkamera) - Technik und Anwendung, Studentische Ausarbeitung, München 2013, S.18, [http://www.pf.bgu.tum.de/edu/pak/tum\\_pak\\_13\\_wehner\\_pre\\_sp2.pdf](http://www.pf.bgu.tum.de/edu/pak/tum_pak_13_wehner_pre_sp2.pdf), (Zugriff am 12.05.2015)

<sup>73</sup> Vgl. Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S.350 f.

### 3.3 Bildgewinnung in einer Lichtfeldkamera

Der folgende Abschnitt behandelt die theoretische Entstehung digitaler Bilder. Dabei wird der Strahlenraum als Darstellungsform für das Lichtfeld innerhalb einer Kamera verwendet. Die folgenden Kapitel erläutern die Abtastung des Lichtfeldes innerhalb einer herkömmlichen und einer plenoptischen Kamera.

#### 3.3.1 Die Bildentstehung und das Lichtfeld innerhalb einer digitalen Kamera

Jede Kamera kann über die Art und Weise, wie sie die plenoptische Funktion abtasten und speichern, charakterisieren werden. Dabei wird häufig auf die Zwei-Ebenen-Parametrisierung zurückgegriffen, um das Lichtfeld innerhalb einer Kamera zu beschreiben. Die folgende Abbildung zeigt einen Lichtstrahl, der von der Umgebung durch die Blendenöffnung  $u$  und von dort auf die Sensorebene  $x$  trifft. Das danebenliegende Koordinatensystem zeigt das Strahlen-Raum-Diagramm als eine abstrakte Darstellung des Lichtfeldes. Jeder Strahl, der auf den Bildsensor trifft, kann als Punkt  $(x, u)$  im Strahlen-Raum-Diagramm abgebildet werden.

---

<sup>74</sup> Vgl. Perwaß, Christian / Wietzke, Lennart: Mikrolinsen – basierte 4D Lichtfeldkarten zur räumlichen Bildfassung durch ein einziges Objektiv, Photonik, Ausgabe 06-2010, S.36 f.

<sup>75</sup> Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik, Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, 6. Auflage, Berlin, 2013, S. 371 f.

<sup>76</sup> Vgl. Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.34 f.

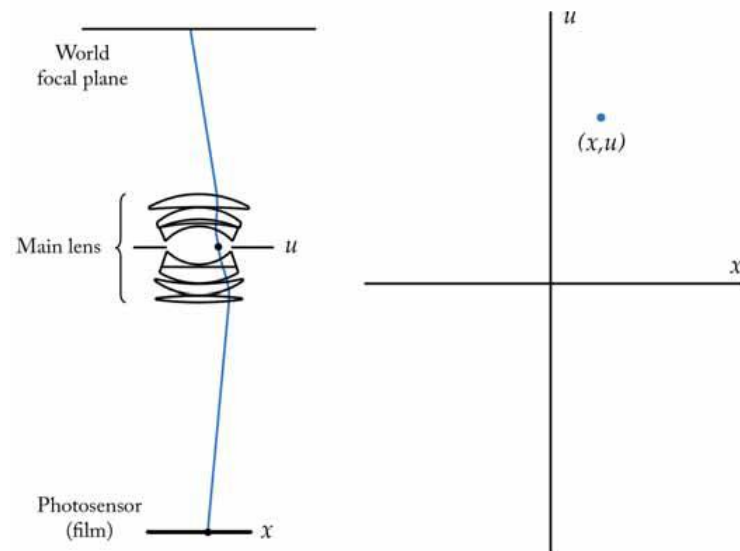


Abbildung 14: Parametrisierung des Lichtfeldes, das in eine Kamera trifft<sup>77</sup>

Die Sensorebene der Kamera stellt die räumliche Achse  $x$  und die Blendenöffnung des Objektivs die Richtungsachse  $u$  dar. Im zweidimensionalen Raum beschränkt sich die Funktion des Lichtfeldes  $L(x, u)$ . Im dreidimensionalen Raum erhalten die Schnittpunkte eine weitere Dimension. Das führt auf der Linse zu dem Schnittpunkt  $(u, v)$  und auf dem Sensor zu dem Schnittpunkt  $(x, y)$ . Damit wäre das Lichtfeld entlang der Strahlen eine Funktion  $L(x, y, u, v)$ .

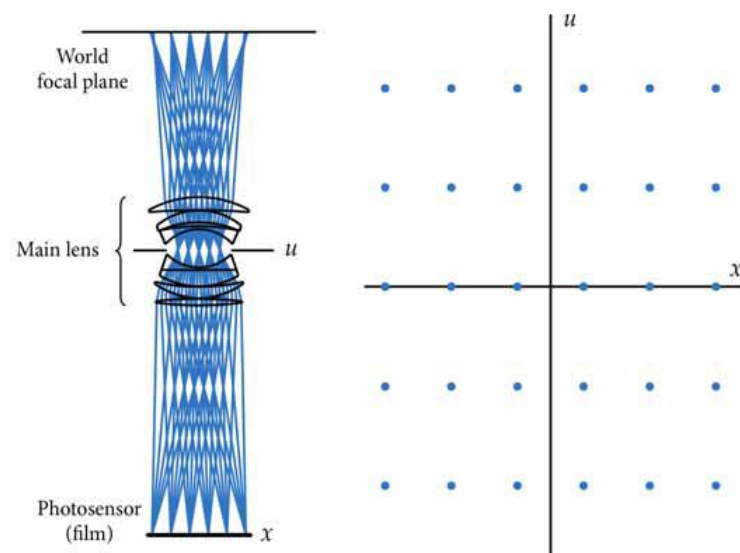


Abbildung 15: Die Summe aller Strahlen, die in die Kamera treffen<sup>78</sup>

<sup>77</sup> Quelle: Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.14

<sup>78</sup> Quelle: Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.15



In einer herkömmlichen Kamera trifft das Licht der Umgebung durch die Blendenöffnung des Objektivs, wird dort gebrochen und trifft dann auf dem Photosensor. Das Foto bildet sich bei einer Digitalkamera auf dem lichtempfindlichen Sensor. Dort erzeugen Photonen freie Elektronen, die auf dem Pixel des Sensors gespeichert werden. Jeder Pixel bildet die Summe aller eintreffenden Lichtstrahlen.

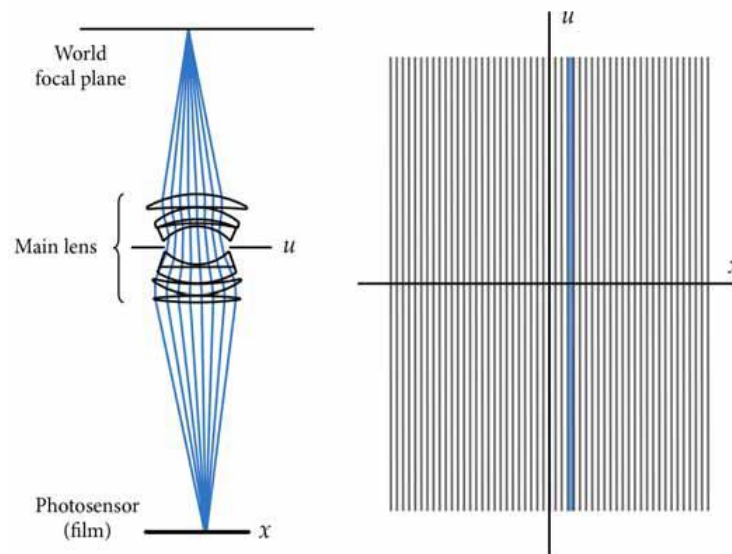


Abbildung 16: Der Strahlenkegel, der einen Pixel in einer Fotografie bildet<sup>79</sup>

Abbildung 16 veranschaulicht die idealisierte Entstehung eines Fotos und zeigt einen blauen Lichtkegel der einen Pixelwert bildet. Dieser Kegel entspricht im Strahlen-Raum-Diagramm der blau durchgezogenen Linie. Die Linie entsteht, da der Kegel den gleichen Schnittpunkt  $x$  auf dem Sensor hat, allerdings unterschiedliche Schnittpunkte  $u$  auf der Linse hat. Durch unterschiedliche Schnittpunkte  $x$ , die unterschiedliche Pixel darstellen, entstehen verschiedene vertikale Linien im Strahlen-Raum. Jede Linie ist die Summe aller Strahlen, die auf den jeweiligen Sensorpixel treffen. Die Abbildung zeigt also die vollständige Entstehung eines digitalen Bildes. Das entstandene Bild speichert somit die räumliche Lage  $x$  auf dem Sensor, enthält allerdings keinerlei Richtungsinformationen  $u$ . Das bedeutet, dass herkömmliche Kameras das eintreffende Licht in Intensität und Farbe aufzeichnen, jedoch keine Informationen darüber speichern können, aus welcher Richtung das eintreffende Licht kommt.<sup>80</sup>

<sup>79</sup> Quelle: Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.16

<sup>80</sup> Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.13 ff.

### 3.3.2 Das abgetastete Lichtfeld innerhalb einer plenoptischen Kamera

Wie in Abbildung 17 dargestellt, entsteht bei einer Lichtfeldkamera ein Gitter im Strahlen-Raum-Diagramm. Dieses Gitter visualisiert das abgetastete Lichtfeld, das von den Sensorpixeln aufgezeichnet wird. Jedes Kästchen repräsentiert ein Bündel von Strahlen, das zu einem Pixel beiträgt. Zur Berechnung des Rasters werden die Strahlen zurückverfolgt. Das geschieht ausgehend von jedem Pixel über dessen übergeordnete Mikrolinse bis zu dem Durchstoßpunkt an dem Hauptlinsensystem. Die Schnittpunkte der Strahlen mit der Mikrolinsenebene und der Objektivlinse sind mit der Position  $(x, u)$  im Strahlen-Raum festgelegt.

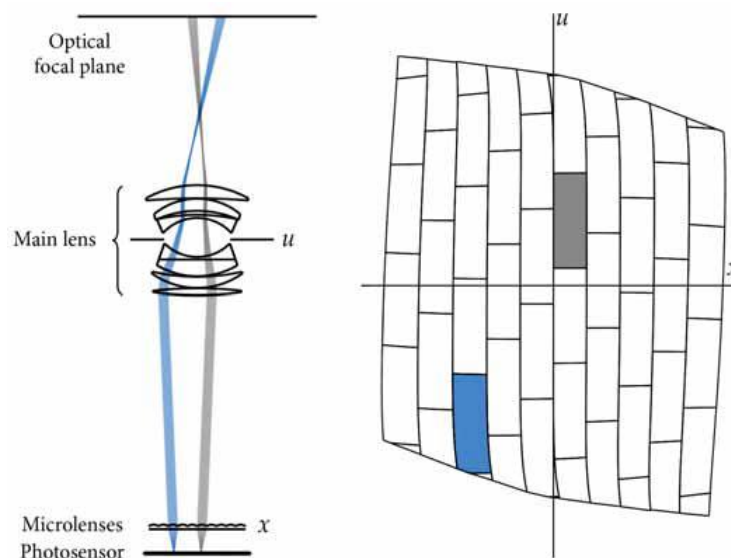


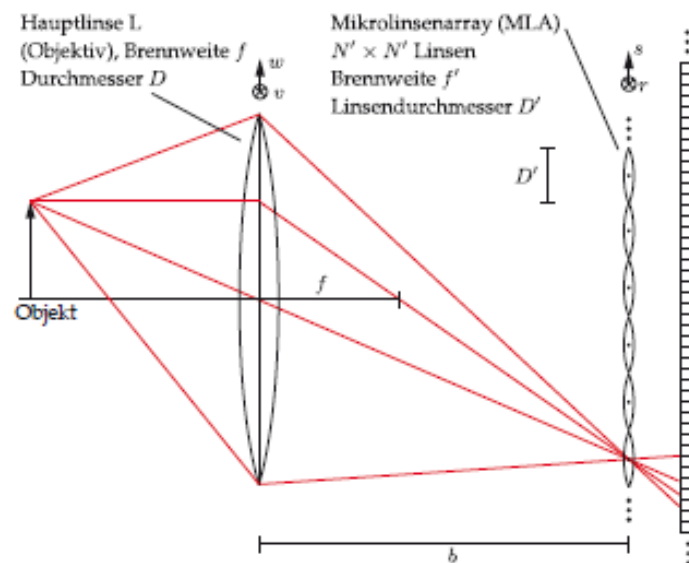
Abbildung 17: Abtastung des aufgenommenen Lichtfeldes einer plenoptischen Kamera <sup>81</sup>

Die Grundlage für die Verfolgung der Lichtstrahlen bildet die in Kapitel 3.1 erwähnte plenoptische Funktion  $L(x, y, u, v)$ . Die Richtung eines Lichtstrahls kann durch die Parametrierung des Lichtfeldes und durch die bekannten Größen innerhalb der Kamera rechnerisch ermittelt werden. Die Richtung des eintreffenden Lichts lässt sich anhand der Durchstoßpunkte an der Blendenöffnung der Objektivlinse  $(u, v)$  und an dem Mikrolinsenarray  $(x, y)$  ermitteln, da bekanntlich das Mikrolinsengitter die Bildebene innerhalb einer Lichtfeldkamera darstellt und nicht der Sensor. Mathematisch gesehen bildet die Objektivlinse die  $(u, v)$ -Hauptebeine im Raum und das Mikrolinsenarray eine parallele  $(x, y)$ -Ebene dazu. Über die Durchstoßpunkte an diesen beiden Ebenen, kann eine Gerade im Raum zwischen den beiden Punkten errechnet werden. Diese Gerade repräsentiert einen eintreffenden Lichtstrahl. Innerhalb der Kamera kann das Lichtfeld als

<sup>81</sup>Quelle: Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.25

vierdimensionale Funktion  $L(x, y, u, v)$  festgehalten werden. Das gilt für alle Pixel, wenn alle Pixel und Mikrolinsen in einem regelmäßigen Gitter angebracht sind.<sup>82 83</sup>

Jede Box entspricht einem schmalen Bündel von Lichtstrahlen in der Kamera. In der Abbildung 17 werden beispielhaft zwei Strahlenbündel und deren Lage im Strahlen-Raum dargestellt. Eine Spalte entspricht der Menge aller Strahlen, die von einer Mikrolinse erfasst werden. Die Breite einer Spalte wird durch die Breite der verwendeten Mikrolinsen bestimmt. Vertikal teilt sich die Spalte nach der Anzahl der Pixel, die unter der Mikrolinse liegen. Im Vergleich entspricht die Spaltenbreite in einer konventionellen Digitalkamera der Breite eines Sensorpixels. Das bedeutet, dass die Lichtfeldkamera mehr Genauigkeit im Abtasten der gerichteten Achse  $u$  bietet. Allerdings ist die Genauigkeit der Abtastung der räumlichen Achse  $x$  geringer, wenn die Zahl der Pixel gleich bleibt. Der grundlegende Kompromiss bei der Erfassung des Lichtfeldes ist also eine geringere endgültige Bildauflösung zugunsten der gesammelten Richtungsauflösung. Im Wesentlichen hängt die resultierende Auflösung einer Lichtfeldkamera von der Anzahl der verwendeten Mikrolinsen ab. Eine Erhöhung der Sensorpixel würde eine Erhöhung der Richtungsauflösung mit sich bringen. Der Kompromiss für die Erfassung eines Ausschnittes des Lichtfeldes, ist also eine Minderung der Bildauflösung, die durch das Mikrolinsengitter entsteht.<sup>84</sup>



<sup>82</sup> Vgl. Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S.353

<sup>83</sup> Vgl. Blachowicz, Tomasz; Ehrmann Andrea: Plenoptische Kameras, Fotografieren in der vierten Dimension, Weinheim, 2012, S.125

<sup>84</sup> Vgl. Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.24 f

Abbildung 18: Aufbau einer Lichtfeldkamera und die optische Abbildung durch die Hauptlinse<sup>85</sup>

### 3.3.3 Ansichtsmöglichkeiten für ein aufgezeichnetes Lichtfeld

Durch die Abtastung des Lichtfeldes in einer Kamera bieten sich umfassende Informationen über die abgebildete Szene. Eine Art, sich die Daten einer Lichtfeldkamera vorzustellen, ist es, dass jede Mikrolinse eintreffendes Licht aufnimmt. Eine weitere Vorstellungsmöglichkeit ist, dass ein Lichtfeldbild eine Szene in einem Gitter verschiedener Blickpunkte aufnimmt. Der Umfang der Blickpunkte ist über die Blendenöffnung der Kamera verteilt. Über der Fläche der Blende bilden sich somit unterschiedliche Parallaxen, die wiederum Informationen über die Tiefe der Objekte einer aufgenommenen Szene mit sich bringen.

#### Das Rohe Lichtfeldbild

Die einfachste Form, das Rohe Lichtfeld zu betrachten, ist das Auslesen der einzelnen Pixelwerte des Sensors. Makroskopisch erscheint das aufgenommene Bild wie eine konventionelle Fotografie. Tatsächlich setzt sich das Bild einer Lichtfeldkamera aus vielen mikroskopischen Scheiben zusammen. Jede Scheibe entspricht dem Bild, das unterhalb einer kreisförmigen Mikrolinse auf dem Sensor entsteht. In der Parametrisierten Darstellung bedeutet das, dass ein Lichtfeldbild ein  $(x, y)$  Gitter von einzelnen Bildern ist, wobei jedes Bild von einer verschiedenen Position  $(u, v)$  der Blendenöffnung auf den Sensor trifft. Die folgende Abbildung zeigt ein solches Sensorbild und hebt zwei Stellen weiter hervor. Das obere, gezoomte Bild zeigt die Nasenspitze des Mannes im Hintergrund. Das untere gezoomte Bild die Nasenspitze des Mädchens.<sup>86</sup>

---

<sup>85</sup> Quelle: Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S.352

<sup>86</sup> Vgl. Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.29 f.

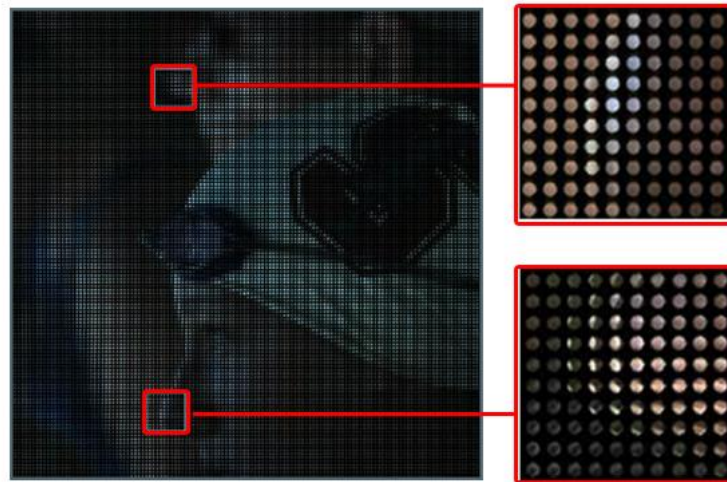


Abbildung 19: Das Rohbild auf dem Fotosensor einer Lichtfeldkamera und vergrößerte Bildausschnitte <sup>87</sup>

### Teilbilder der Mikrolinsen

Eine zweite Ansicht eines aufgenommenen Lichtfeldes ist ein Gitter aus vielen Teilbildern, die „Sub-Aperture-Images“ genannt werden. Diese Ansicht ist für die Vorstellung der Stereobildgewinnung von Bedeutung. Jedes Bild einer Subapertur ist das Ergebnis, das aus demselben Pixel unterhalb jeder Mikrolinse und dem Abstand zur  $(u, v)$  – Ebene für eine gewünschte Teilregion der Blendenöffnung errechnet wird. Das bedeutet, dass alle Strahlen, die durch einen festen Punkt  $(u, v)$  der Hauptlinse gehen, einem bestimmten Pixel unter jeder Mikrolinse zugeordnet sind. Das resultierende Bild ist kreisförmig, da die Blende der Kamera kreisförmig ist. Die einzelnen Bilder des Gitters sind also Teilbilder, die auf einer Stelle der Blendenöffnung entstehen. Die einzelnen Teilbilder weisen bei näherer Betrachtung parallaxe Verschiebungen auf. Bei genauer Betrachtung der vergrößerten Teilbilder in Abbildung 20 wird die perspektivische Verschiebung zwischen dem Mädchen im Vordergrund und dem Mann im Hintergrund deutlich. Bei dem vergrößerten Ausschnitt aus der unteren Teilregion erscheint der Mann mehrere Pixel höher, da er aus einem niedrigeren Blickwinkel gesehen wird. <sup>88 89</sup>

<sup>87</sup> Quelle: Ng,Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.28

<sup>88</sup> . Ng, Ren: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, Stanford, 2005, S.3

<sup>89</sup> Vgl. Ng,Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.31 f.

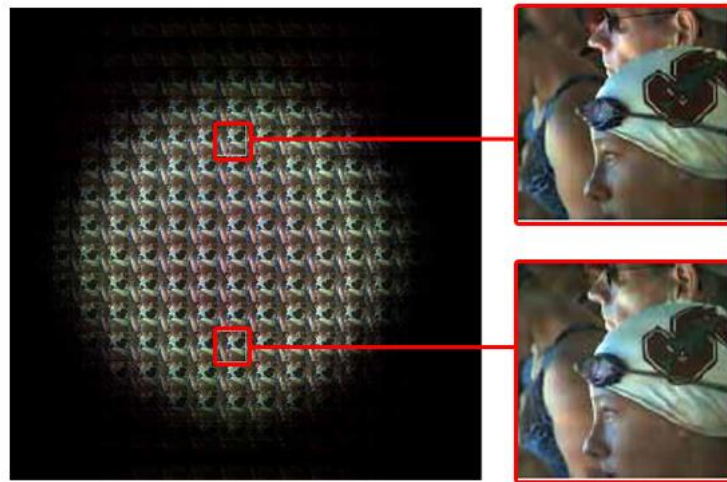


Abbildung 20: Teilbilder einer Lichtfeldaufnahme und vergrößerte Bildausschnitte<sup>90</sup>

Wird der Lichtweg in umgekehrter Reihenfolge betrachtet, wird die Gewinnung der Teilbilder deutlicher. Jedem Pixel ist eine bestimmte Mikrolinse zugeordnet und darüber ein fester Teilbereich der Hauptlinse. Das Pixel A in Abbildung 21 wird durch die davorliegende Mikrolinse belichtet und auf der Hauptlinse abgebildet. Es trifft also nur Licht, das durch den mit C gekennzeichneten Teilbereich der Hauptlinse einströmt, auf dem Pixel A. Von anderen Mikrolinsen wird der Teilbereich C ebenfalls auf einen bestimmten anderen Pixel gegeben, zum Beispiel Pixel B. Unter jeder Mikrolinse wird also ein bestimmter Teilbereich der Hauptlinse einem bestimmten Pixel zugeordnet. Die Hauptlinse ist mit anderen Worten in Teilbereiche unterteilt, die Summe der Teilbereiche entspricht der Größe der Blendenöffnung. Es entsteht also ein Bild über der Teilapertur C, das aus einer bestimmten Anzahl Pixeln besteht. Ein anderer Pixel der von der gleichen Mikrolinse wie der Pixel A belichtet wird, entspricht einer anderen Teilapertur der Hauptlinse. Die Hauptlinse ist demnach in eine bestimmte Anzahl von Teilaperturen aufgeteilt.

<sup>90</sup> Quelle: Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.46

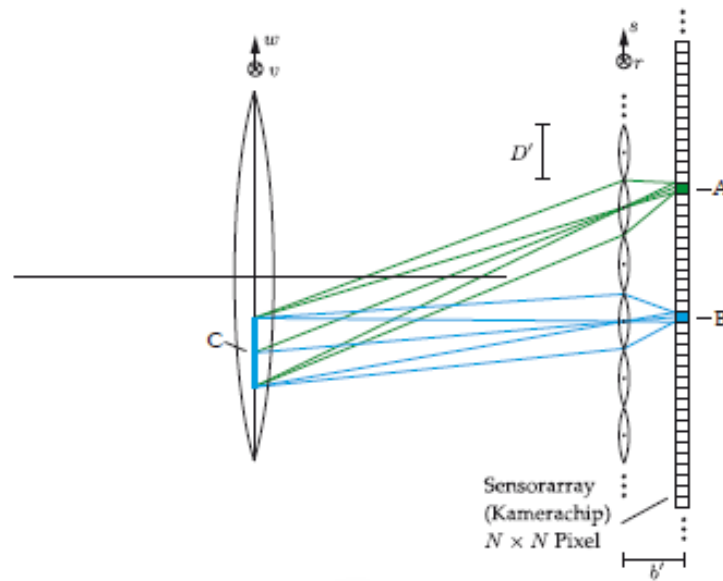


Abbildung 21: Aufbau einer Lichtfeldkamera und die optische Abbildung durch das Mikrolinsengitter<sup>91</sup>

Die Elemente einer Lichtfeldkamera können also in Felder eingeteilt werden. Das Mikrolinsengitter besteht aus  $N \times N'$  Linsen. Ebenso ist die Auflösung des Sensors in  $N \times N$  Pixeln bekannt. Die quadratische Form wird für die Vereinfachung angenommen. Trifft die Auslegung der Mikrolinsen wie in Kapitel 3.2.2 zu, überdeckt das von der Mikrolinse auf den Sensor geworfene Bild eine bestimmte Anzahl  $\eta$  an Pixeln ( $\eta = (\frac{N}{N'})^2$ ). Die Richtung des eintreffenden Lichts kann dann in  $\eta$  Werten abgetastet werden. Durch die Überdeckung werden also  $N^2$  Pixel des Sensors zu  $(N')^2$  Feldern zusammengefasst.<sup>92</sup>

<sup>93</sup> <sup>94</sup>

### 3.4 Möglichkeiten der Nachbearbeitung eines aufgenommenen Lichtfeldbildes

Im folgenden Kapitel werden Möglichkeiten der Nachbearbeitung beschrieben, die sich aus den Informationen des aufgenommenen Lichtfeldes einer plenoptischen Kamera ergeben. Das beinhaltet die nachträgliche Neuausrichtung der Fokusebene und die Ausdehnung des Schärfentiefenbereichs. Desweiteren kann eine Verschiebung des Blickwinkels erreicht werden.

<sup>91</sup> Quelle: Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S.352

<sup>92</sup> Vgl. Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.24 ff.

<sup>93</sup> Vgl. Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S.353

<sup>94</sup> Vgl. Ng, Ren: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, Stanford, 2005, S.3



### 3.4.1 Theoretische Änderung des Strahlen-Raums bei der Fokussierung

Um zu verstehen, wie die digitale Neuausrichtung des Fokus funktioniert, ist es wichtig zu wissen, was theoretisch bei der fotografischen Fokussierung passiert. Das lässt sich mit Hilfe des Strahlen-Raum-Diagramms erklären. Abbildung 22 zeigt die Änderungen des Strahlen-Raum-Diagramms bei verschiedenen fokussierten Tiefen einer digitalen Kamera. In dieser Darstellung ist die Bildebene  $x$  und die Blendenebene  $u$  fest und der Abstand zwischen Sensor und Objektiv ändert sich. Das entspricht der Fokussierung in einer herkömmlichen Kamera, indem der Fokus auf ein näheres oder ein weiter entferntes Objekt eingestellt wird.

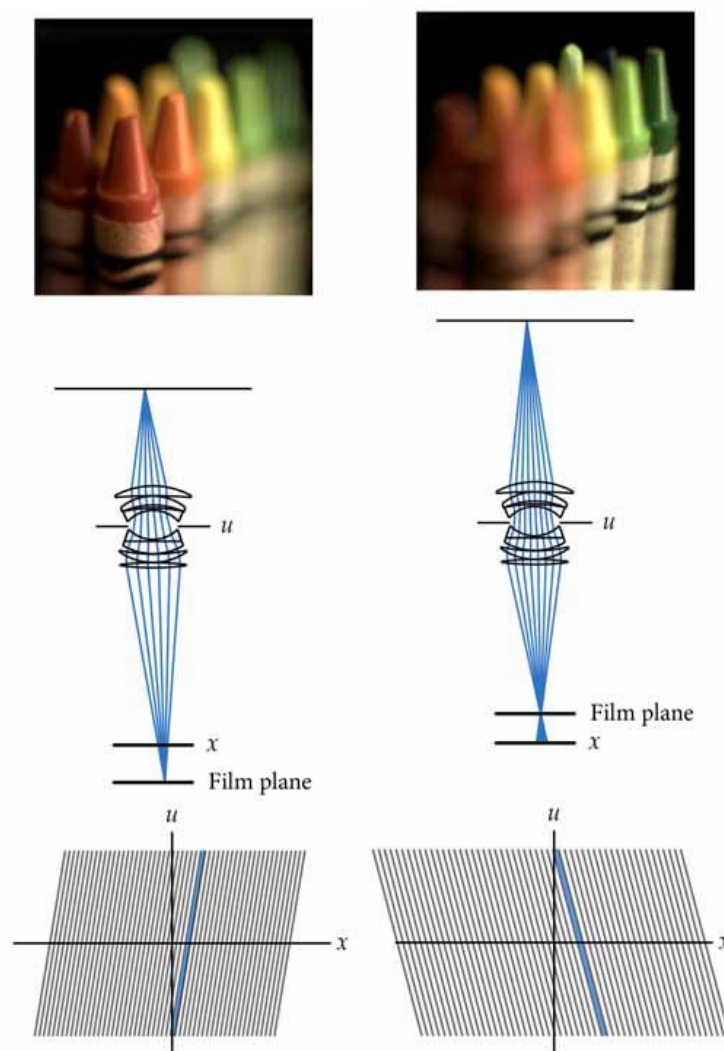


Abbildung 22: Änderung des Strahlen-Raum-Diagramms, bei der Änderung des Fokus,<sup>95</sup>

<sup>95</sup> Quelle: Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.18



Tatsächlich bewegt sich bei der Fokussierung ein Glaselement entlang der optischen Achse des Objektivs, und nicht der Sensor der Kamera. In der linken Abbildung rückt die Fokusebene näher an die Kamera. Damit ein scharfes Bild entsteht, muss der Sensor im Konvergenzpunkt liegen und somit weiter von der Linse entfernt werden. Das darunterliegende Strahlen-Raum-Diagramm zeigt die Linie, die in der Bildebene  $x$  entsteht. Sie hat einen positiven Anstieg, da mehrere Schnittpunkte an der  $x$ -Ebene entstehen. Das Bild, das auf der Bildebene  $x$  entsteht, ist in diesem Fall unscharf. Im Gegensatz dazu entstehen vertikale Linien mit einem negativen Anstieg, wenn die Fokusebene weiter entfernt wird. Der Konvergenzpunkt rückt näher zur Linse. Für ein scharfes Bild müsste der Sensor in den Konvergenzpunkt geschoben werden. Der vorzeichenbehaftete Anstieg der Linien kann als Bewegung des Konvergenzpunktes um die Bildebene  $x$  verstanden werden. Somit hängt der Anstieg der Linien im Strahlen-Raum-Diagramm von der Entfernung zwischen Konvergenzpunkt und der  $x$  – Ebene ab. Diese Entfernung ist für jeden Pixel des Fotos gleich groß, da sich die Sensorebene parallel zur Bildebene bewegt. Diese Tatsache wird für die Berechnung der digitalen Refokussierung ausgenutzt.<sup>96</sup>

### 3.4.2 Die digitale Refokussierung und Erweiterung der Schärfentiefe

Die Abbildung 23 zeigt die Übertragung der theoretischen Fokusänderung auf das abgetastete Lichtfeld. Der graue Kegel in (A) zeigt einen Punkt der optischen Fokusebene, der über das Hauptlinsensystem auf eine Mikrolinse trifft und von da auf mehrere Sensorpunkte gegeben wird. Der blaue Kegel in (A) zeigt die Strahlen, die zu einem Pixel in einem refokussierten Bild beitragen, also ausgehend von einer virtuellen Fokusebene. Die Darstellung (B1) visualisiert zwei Streifen im Strahlen-Raum. Der graue Streifen zeigt den Wert der ausgegebenen Pixel unter einer Mikrolinse in einem Foto, das auf die optische Ebene fokussiert wurde. Der blaue schräge Streifen nutzt auf Grundlage des vorhergehenden Kapitels eine Idealisierung der Pixel und deren übergeordnete Mikrolinse. (B2) zeigt die geometrische Strahlenverfolgung zwischen den Pixeln der Sensorfläche und der Mikrolinsen in diesen Bereichen. Jeder der eingefärbten Pixel entspricht einem Kasten in (B3). Über den idealisierten blauen Streifen wird die Lage der Pixel geschätzt, die für die Erstellung eines Pixels in einem neufokussierten Bild notwendig sind.<sup>97</sup>

---

<sup>96</sup> Vgl. Ng,Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.33 f.

<sup>97</sup> Vgl. Ng,Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.42 f.

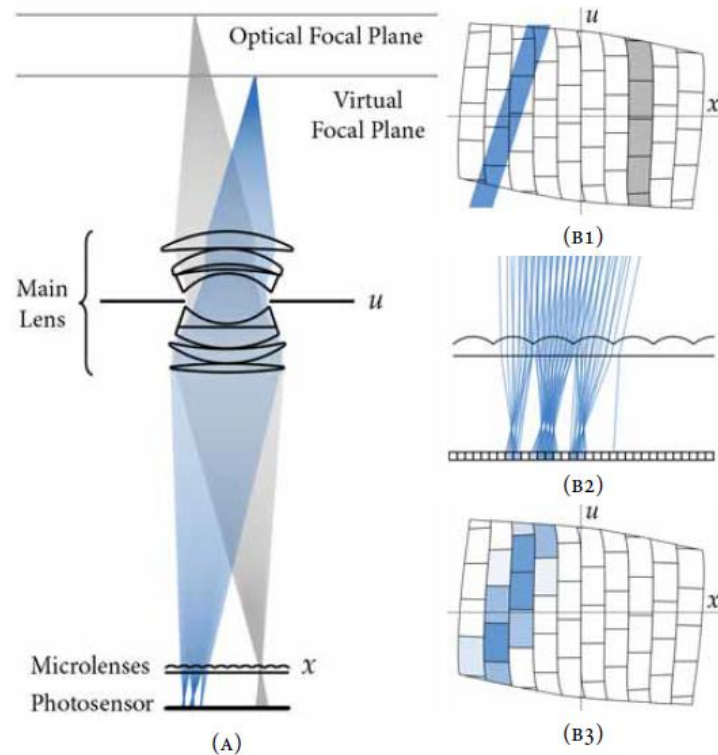


Abbildung 23: Übersicht der Verarbeitung eines Lichtfeldes<sup>98</sup>

Mit anderen Worten beruht die digitale Refokussierung auf der Simulation des Lichtflusses der Lichtstrahlen innerhalb einer realen Kamera. Dazu werden die aufgezeichneten Lichtstrahlen in der Software verfolgt. Bei der Neuausrichtung des Fokus erfolgt die physikalische Simulation der Lichtstrahlen auf die gewünschte Tiefe. Das geschieht durch eine virtuelle Kamera mit den gleichen optischen Eigenschaften. Mit diesen bekannten Eigenschaften lässt sich der Lichtweg berechnen, der zustande kommen würde, wenn sich der Fokus nach vorn oder nach hinten verschiebt. Die Software berechnet also den neuen Konvergenzpunkt für eine scharfe Abbildung an dieser Stelle und erzeugt dort einen virtuellen Sensor. Für den virtuellen Sensor wird das hinterlegte Licht an jedem Punkt auf der virtuellen Bildebene summiert. Innerhalb der Software werden dementsprechend die aufgezeichneten Strahlen über das parametrisierte Lichtfeld Neuberechnet. Dieser Vorgang kann als Neuausrichtung der Strahlen verstanden werden. Über die internen Algorithmen wird das abgetastete Lichtfeld schrittweise ausgewertet und ein neuer Konvergenzpunkt, der in der Nähe des ursprünglichen Punktes liegt, kann geschätzt werden. Die Neuberechneten Strahlen werden entsprechend der optischen Eigenschaften der Hauptlinse und der Mikrolinsen konstruiert. Bei der digitalen Refokussierung wird also die virtuelle Bildebene nach vorn oder nach hinten auf den Neuberechneten Konvergenzpunkt verschoben. Die Werte

<sup>98</sup> Quelle: Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.27

der Pixel werden für die virtuelle Fokusebene Neuberechnet. Ein Pixel ergibt sich durch die Berechnung des Integrals entlang der blauen Felder wie in (B3).<sup>99</sup>

Mit Hilfe der verschiedenen scharf berechneten Bilder, ist es möglich, Einfluss auf die Schärfentiefe eines Bildes zu nehmen. Das bedeutet, dass die Schärfentiefe ausgedehnt werden kann. Das entspricht in herkömmlichen Kameras einer Aufnahme mit einer geringen Blendenöffnung. Die Erweiterung der Schärfentiefe beruht auf der Berechnung der schärfsten Teile der Bilder, die in dem Bereich der Refokussierung berechnet werden können. Diese Methode ist mit dem sogenannten Focus Stacking vergleichbar. Dazu wird eine Reihe von Bildern aufgenommen, in denen sich lediglich der Fokus verschiebt. Das Motiv und der Bildausschnitt bleiben dabei gleich. Mit geeigneter Software wird dann die erweiterte Schärfentiefe berechnet. Der Vorteil der Gewinnung dieser erweiterten Schärfentiefe mit einer Lichtfeldkamera ist, dass diese bei einer großen Blendenöffnung realisierbar ist, wodurch weniger körnigere Bilder entstehen.<sup>100 101</sup>

Die folgende Abbildung zeigt eine Lichtfeldaufnahme mit verschiedenen Fokuseinstellungen. Im linken Bild ist der Fokus auf der Skulptur im Vordergrund und der Hintergrund ist deutlich unscharf. Das mittlere Bild zeigt ein refokussiertes Bild, bei dem der Hintergrund im Fokus und der Vordergrund im Unschärfebereich liegen. Das rechte Bild zeigt die Aufnahme mit der erweiterten Schärfentiefe. Hintergrund und Vordergrund werden scharf abgebildet.

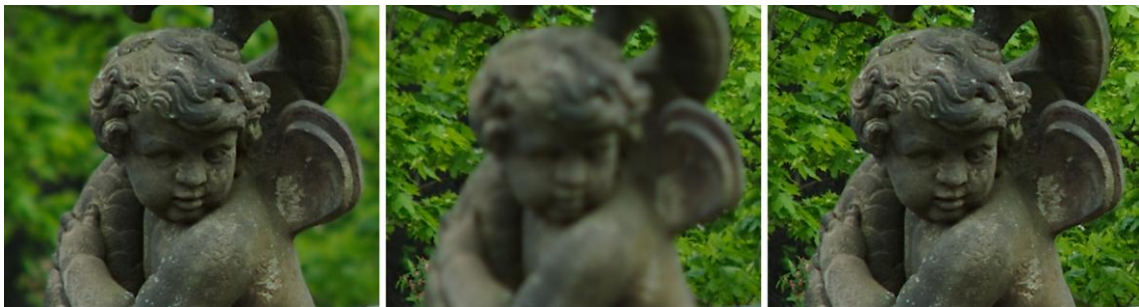


Abbildung 24: vergrößerte Ansicht einer Lichtfeldaufnahme mit veränderten Fokuseinstellungen, Links: wie Aufnahme, Mitte: Refokussiert auf Hintergrund, Rechts: erweiterte Schärfentiefe bei der Hintergrund und Vordergrund scharf abgebildet sind.<sup>102</sup>

<sup>99</sup> Vgl. Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.26 f.

<sup>100</sup> Vgl. Focus-Stacking, Mehr Schärfentiefe, <https://www.dpunkt.de/leseproben/2891/Kapitel%203.pdf>, S.3

<sup>101</sup> Vgl. Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006, S.49 f.

<sup>102</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Lytroaufnahme, „Skulptur“

### 3.4.3 Mehrere Blickwinkel und Stereobildgewinnung

Jeder Körper im Raum sendet Lichtstrahlen in alle Richtungen aus und erfüllt seine Umgebung mit Licht und Schatten. Wenn ein Objekt von einer Lochkamera aufgenommen wird, so entsteht ein Bild aus einem eintreffenden Lichtkegel. Wenn das gleiche Objekt von einer zweiten benachbarten Lochkamera aufgenommen wird, so entstehen zwei verschiedene Bilder aus zwei Lichtkegeln. Beide Bilder zusammen geben zusätzliche Informationen über die Struktur des Lichts, das ein Objekt umgibt. Diese Informationen helfen bei der Interpretation dreidimensionaler Objektformen. Eine herkömmliche Kamera mit einem Objektiv sammelt Licht aus einem Kontinuum von Standpunkten und somit eine Vielzahl an Lichtkegeln. Der Sensor erfasst den Durchschnitt der einzelnen Bilder, die aus unterschiedlichen Positionen der Linse eintreffen.

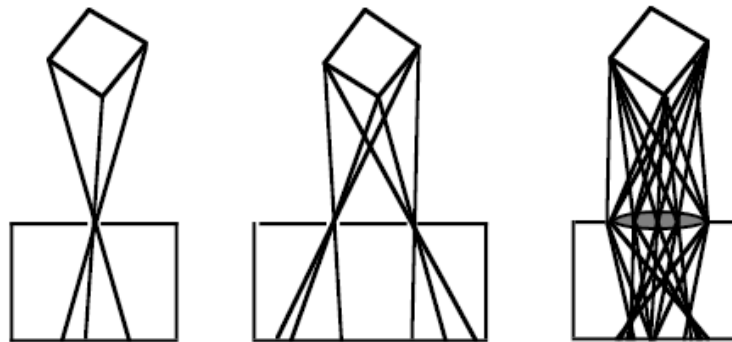


Abbildung 25: Links: Lichtkegel in einer Lochkamera, Mitte: Lichtkegel in zwei Lochkameras, Rechts: Bild, das durch ein Linsensystem entsteht<sup>103</sup>

Wird ein Objekt scharf aufgenommen, dann werden die Objektpunkte auf die Sensorebene gebündelt. Das entstehende Leuchtdichteprofil wäre in diesem Fall ein Punkt. Rückt das Objekt bei gleicher Fokussierung näher oder weiter weg, so wird es unscharf auf dem Sensor abgebildet. Das Leuchtdichteprofil wird außerhalb der Fokusebene breiter und gedämpfter. Über das Leuchtdichteprofil kann betrachtet werden, wie Objekte außerhalb der Fokusebene abgebildet werden. Angenommen, eine exzentrische Blende befindet sich in der Objektivlinse und ein Objekt wird scharf abgelichtet, dann ist das Leuchtdichteprofil nach wie vor ein Punkt. Wird das Objekt näher an der Kamera platziert, dann ist das Bild verschwommen und wird von der Mitte nach rechts verschoben, da die Linse selektive Strahlen übergibt. Wenn das Objekt weiter weg ist, so findet die Verschiebung nach links statt. Das Ausmaß der Verschiebung des Leuchtdichteprofiles ist proportional zur Menge der Unschärfe, die sich aus dem Fokus ergibt. Aus der Amplitude und der Richtung der Verschiebung kann die Entfernung des Objektes ermittelt werden. Anhand der Verdrängung durch die Hauptlinse kann die Tiefe eines

<sup>103</sup> Quelle: Adelson, Edward H.; Wang John Y.A.: Single Lens Stereo with a plenoptic Camera, S.1

Objektes in einer Szene analysiert werden. Diese Methode wird als Single-Lens-Stereo bezeichnet.

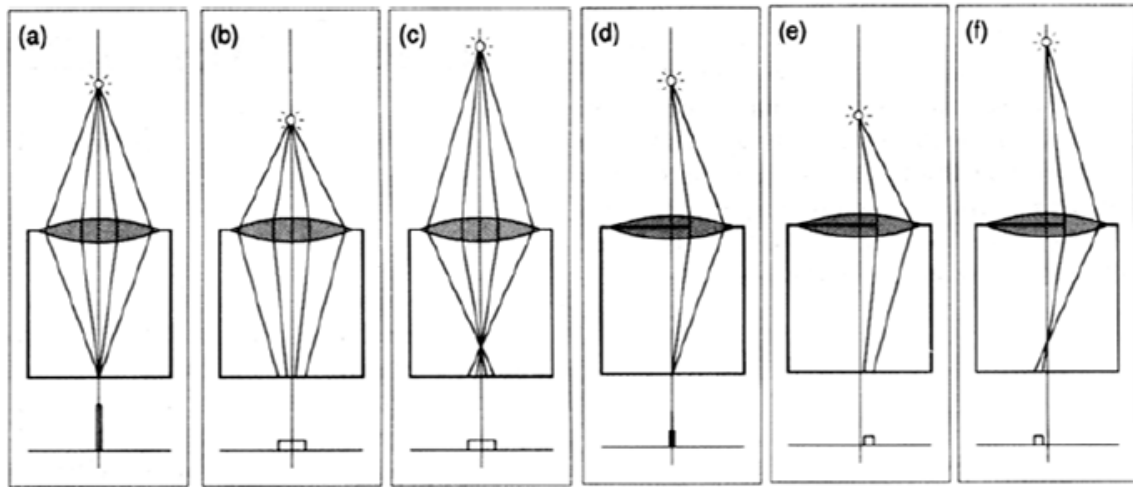


Abbildung 26: Prinzip für Stereo über eine Linse, aufgenommenes Objekt mit Leuchtdichteprofil, a) Objekt im Fokus, b) Objekt ist näher, c) Objekt ist weiter weg, d) e) f) bei exzentrischer Blende<sup>104</sup>

Die vorangegangene Beschreibung basiert auf der Anhäufung mehrere Einzelaufnahmen. In einer Lichtfeldkamera werden diese Bildinformationen in einer Aufnahme erworben. Das Licht aus verschiedenen Blickwinkeln wird durch die Mikrolinsen der Lichtfeldkamera auf den Photosensor gegeben, da das auftreffende Licht unter der Mikrolinse auf mehrere Punkte des Sensors aufgeteilt wird. Objektpunkte, die auf der Fokusebene liegen, werden zentral unter der Mikrolinse abgebildet. Wenn das Objekt näher oder weiter weg ist, dann verteilt sich das Licht auf eine bestimmte Weise. Objektpunkte, die näher sind, verschieben sich unter den Mikrolinsen sukzessiv nach links. Eine sukzessive Verschiebung nach rechts findet bei entfernteren Objektpunkten statt. Dadurch kann festgestellt werden, aus welchem Teilbereich der Objektivlinse das Licht kam. Das Mikrolinsengitter kann daher auch als Array von winzigen Kameras angesehen werden.

Eine Lichtfeldkamera speichert Informationen darüber, wie die Umgebung aus allen möglichen Standpunkten über der Objektivlinse erscheint. Zum Speichern dieser Informationen wird die Struktur des Lichts aus verschiedenen Subregionen der Objektivlinse festgehalten. Die aufgezeichneten Informationen ermöglichen es, wie bereits beschrieben, die Bildinformationen aus jeder Teilregion der Hauptlinse zu rekonstruieren. So kann in einem aufgenommenen Bild eine Bewegung des Blickwinkels in horizontaler und vertikaler Richtung simuliert werden. Das Ausmaß der virtuellen

<sup>104</sup> Quelle: Adelson, Edward H.; Wang John Y.A.: Single Lens Stereo with a plenoptic Camera, S.2

Verschiebung und die mögliche Tiefenauflösung hängen von der Größe der Objektivlinse ab. Die maximale Stereobasis einer Lichtfeldkamera ist dementsprechend so groß wie der Objektivdurchmesser. Diese ist, tendenziell niedriger als die von binokularen Stereosystemen und eignet sich daher besonders für Nah- und Makroaufnahmen. Mit Hilfe der berechneten Bilder der Teilaperturen, die zueinander perspektivisch verschoben sind, und dem multiokularen Stereoverfahren, kann unter anderen auch die 3D-Gestalt eines Objektes konstruiert werden.<sup>105 106 107</sup>

Die folgende Abbildung zeigt eine Lichtfeldaufnahme, bei der die Perspektive verschoben wurde. Die einzelnen Bilder zeigen die Verschiebung in die äußeren Ecken der Aufnahme. Die roten Rechtecke markieren korrespondierende Punkte in den Bildern. Entlang der Linien ist die Verschiebung und die Veränderung zwischen Vordergrund und Hintergrund zuerkennen. Ebenso wird die perspektivische Verschiebung durch den Abstand der Markierung zum Bildrand deutlich.

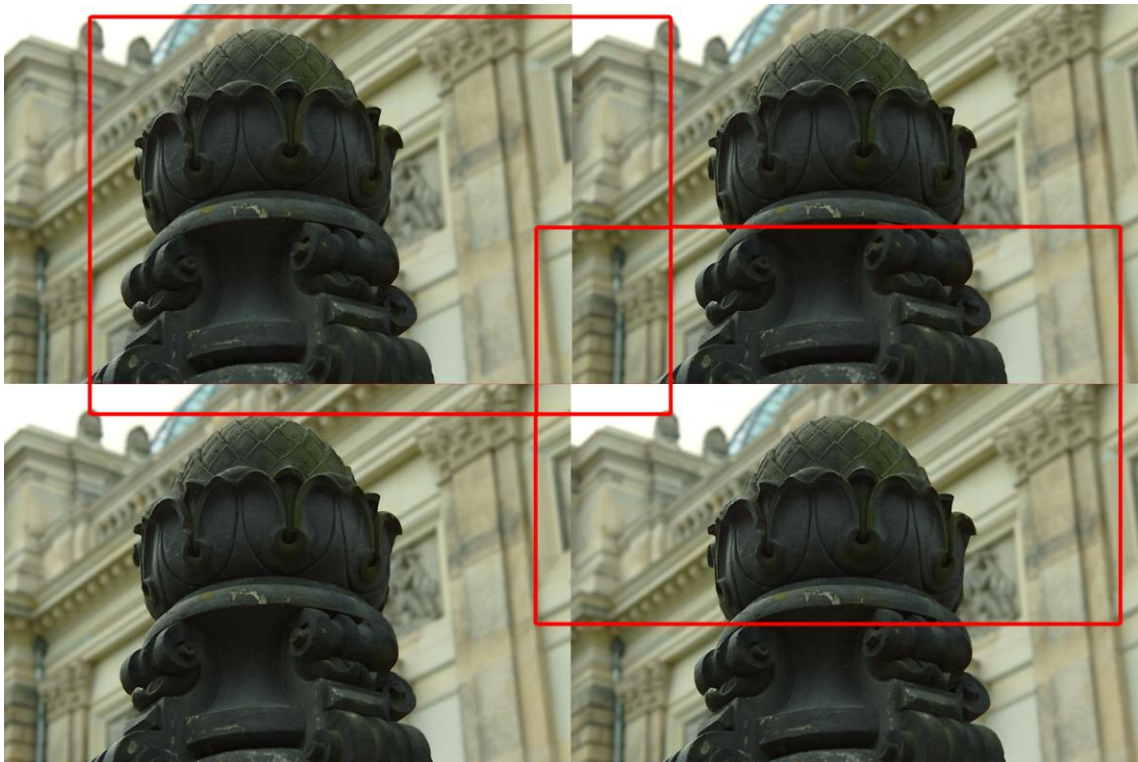


Abbildung 27: eine Lichtfeldaufnahme bei der die Perspektive verschoben wurde. Die Eckpunkte der Markierung zeigen korrespondierende Punkte in den einzelnen Bildern.<sup>108</sup>

<sup>105</sup> Vgl. Adelson, Edward H.; Wang John Y.A.: Single Lens Stereo with a plenoptic Camera, S.2 ff.

<sup>106</sup> Vgl. Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, S.354

<sup>107</sup> Vgl. Perwaß, Christian / Wietzke, Lennart: Mikrolinsen – basierte 4D Lichtfeldkarten zur räumlichen Bilderfassung durch ein einziges Objektiv, Photonik, Ausgabe 06-2010, S.36 f.

<sup>108</sup> Quelle: Fechner, Philipp; Eichler, Jeremias: Lytroaufnahme, „Treppengang“

## 4 Versuchsvorbereitungen

Das folgende Kapitel beschreibt das Konzept des Versuchsaufbaus. Es beschäftigt sich mit dem Ziel des Experiments und den Vorüberlegungen, die für folgende Durchführung des Versuchs gemacht wurden. Außerdem gibt dieses Kapitel einen Überblick zur verwendeten Software, die für die Bearbeitung des Materials verwendet wurde.

### 4.1 Konzept für den Versuchsaufbau

Der Versuch beinhaltet die Umsetzung stereoskopischer Videosequenzen mit einer Lichtfeldkamera und stellt die Lichtfeldkamera als Aufnahmetechnik für Stereo3D vor. Außerdem sollen die Möglichkeiten, die sich für die Postproduktion bieten, aufgezeigt und visuell unterstützt werden. Für die Versuchsreihe wird dabei auf die „Lytro Illum“ zurückgegriffen. Da diese Kamera eine Lichtfeld-Fotokamera ist und nicht mit einer Videofunktion ausgestattet ist, erfolgt die Erstellung der stereoskopischen Videosequenzen mittels Timelapse-Zeitraffer. Das bedeutet, dass die Videos mit mehreren Einzelbildern in der Postproduktion zu einer Sequenz zusammengefügt werden. Die endgültigen Clips sollen eine Länge von drei bis vier Sekunden haben. Für eine störungsfreie Betrachtung sind mindestens 25 Bilder pro Sekunde notwendig. Das ergibt in der Summe, für jedes ausgewählte Motiv, eine Bildreihe von 75 bis 100 Bildern. Damit die endgültigen Videos auch als solche erkannt werden und kein statischer starrer Eindruck entsteht, soll mit einem Kameraslider eine Kamerafahrt durchgeführt werden.

Die Motive sollen typische und häufig auftretende Aufnahmen im Film- und Fernsehbereich darstellen. Dazu sollen Landschafts-, Architektur- und Nah- beziehungsweise Detailaufnahmen umgesetzt werden. Bei der Motivwahl ist vor Ort darauf zu achten, dass die Funktion der nachträglichen Refokussierung, die durch die Lichtfeldtechnologie möglich ist, auf die gewählte Szene anwendbar ist.

Die Möglichkeiten der Postproduktionen werden anschließend dokumentiert und einzelne Arbeitsschritte aufgezeigt. Dabei wird auf den Umgang mit der Software von „Lytro“ eingegangen. Die Einzelschritte der Produktionskette, wie Import, Bearbeitung, Export sowie die Weiterverarbeitung des Materials, wird beispielhaft aufgezeigt. Dazu werden die möglichen Einstellungsparameter, die von der jeweiligen Software geboten werden, vorgestellt. Ebenso werden die Arbeitsschritte und die verwendete Software zur Erstellung der stereoskopischen Sequenzen dargestellt. Die erstellten Materialien werden auf einer DVD gespeichert und der Arbeit beigelegt.



## 4.2 Vorstellung der Kamera „Lytro Illum“

Für die Entscheidung, die Versuche mit der „Lytro Illum“ zu realisieren, sprechen folgende Gründe. Die Kamera ist im Konsumerbereich einzuordnen und somit für jeden zugänglich. Die Kamera bietet den Vorteil, dass sie nicht stationär gebunden ist und keine zusätzliche Technik zum Verarbeiten der Daten notwendig ist. Außerdem ist die Software von Lytro kostenfrei, wodurch die Weiterverarbeitung der Lichtfeldrohdaten sichergestellt ist.

### 4.2.1 Technische Daten und Kurzbeschreibung

Die „Lytro Illum“ ähnelt in ihrer Haptik und äußerlichen Erscheinung einer herkömmlichen Digitalkamera. Sie ist mit einem festverbauten Objektiv ausgestattet, das einen 8-fach optischen Zoom zulässt. Das entspricht einer Brennweite von 30 mm bis 250 mm.



Abbildung 28: Lytro Illum<sup>109</sup>

Außerdem verfügt die „Illum“ über einen klappbaren vier Zoll Touchscreen und eine sehr nutzerfreundliche Bedienoberfläche. Die Änderung der Brennweite und des Fokus kann wie gewohnt, über die jeweiligen Ringe am Objektiv, vorgenommen werden. Die Fokusweite der Kamera variiert abhängig von der eingestellten Brennweite des Objektivs. Beim Weitwinkel liegt die Fokussierweite bei etwa 25 cm Entfernung von der Sensorebene. Bei maximaler Teleeinstellung liegt die Fokussierweite bei etwa 10 m Entfernung von der Sensorebene. Die Einstellungen an ISO-Werten und Verschlusszeiten können in den entsprechenden Belichtungsmodi gemacht werden. Die Beson-

---

<sup>109</sup> Lytro Inc; Consutecc GmbH: Lytro Illum, Datenblatt,  
[http://www.consutecc.com/images/pdf/Lytro\\_ILLUM\\_Datenblatt.pdf](http://www.consutecc.com/images/pdf/Lytro_ILLUM_Datenblatt.pdf), S.1



derheit ist, dass keine Änderung an der Blende der Kamera möglich ist, da sie mit einer festen Blende von  $f/2$  ausgestattet ist. Das hängt damit zusammen, dass die Richtungsinformationen über den ganzen Objektivdurchmesser gesammelt werden. Weitere technische Daten können aus der beigefügten Übersichtstabelle entnommen werden.

Auch die Bedienung ist für Anwender, die etwas Erfahrung im Bereich der Fotografie haben, leicht zugänglich. Im rechten Bildschirmrand befindet sich die Menüleiste, die alle Funktion und Einstellungsmöglichkeiten der Kamera bereithält. Die Menüleiste kann individuell angepasst werden. Die „Lytro Illum“ verfügt über vier auswählbare Belichtungsprogramme, in denen Einstellungen zum ISO-Wert, zur Belichtungskorrektur und an der Verschlusszeit vorgenommen werden können. Die Programme sind jeweils mit [P] für Program, [I] für ISO-Priority, [S] für Shutter Priority und [M] für Manual gekennzeichnet. Der Program Mode stellt die ISO und die Verschlusszeit automatisch ein. Im ISO Priority Mode kann der ISO-Wert manuell angepasst werden, die Verschluss und die Belichtungskorrektur werden automatisch eingestellt. Im Shutter Priority Mode wird die Verschlusszeit automatisch aus dem gewählten ISO-Wert und der Belichtungskorrektur gewählt. Der Manual Mode bietet die manuelle Einstellung von Verschlusszeit und ISO-Wert. Zum Ändern der Werte ist die Kamera mit zwei Drehrädern ausgestattet, jeweils eines an der Vorder- und eines an der Hinterseite der Kamera.<sup>110 111</sup>

### 4.2.2 Der Refokussierbereich und das Tiefenhistogramm

Der größte Unterschied zwischen der Lytro und einer herkömmlichen Kamera liegt im Umgang mit der Fokussierung. Bei konventionellen Kameras wird die Schärfeebene festgelegt und der Schärfentiefebereich kann über die Blende reguliert werden. Da die Illum mit einer festen Blende ausgestattet ist, ergeben sich bei der Bildgestaltung einige Besonderheiten. Der Schärfebereich sollte so gewählt sein, dass die Elemente, die von Interesse sind, in ihrer Tiefe erfasst werden. Dazu sollte der Fokuspunkt innerhalb des refokussierbaren Bereichs liegen. Die Lytro bietet einige Anzeigen und Hilfsmittel an, die dem Nutzer ein Tiefen-Feedback in Echtzeit anzeigen. Die Illum zeigt dabei einen positiven und negativen Bereich um die gewählte Fokusebene an. Durch drücken des Lytro-Buttons werden die refokussierbaren Bereiche in Form einer Assistentenleiste und das sogenannte Tiefenhistogramm eingeblendet. Diese Anzeige gibt die Bereiche der Aufnahme an, die relativ zu den Entfernungen von der Kamera scharf gestellt werden können. Objekte, die in dem angegebenen Bereichen liegen, können nach dem Aufzeichnen des Bildes refokussiert werden. Die blauen und orangefarbenen

---

<sup>110</sup> Vgl. Profifoto Spezial 141, Sonderheft für professionelle Fotografie „Lytro Illum“, 2015, S. 9 f.

<sup>111</sup> Vgl. Lytro Illum User Manual, All Chapters, S. 16 f.

Balken der Assistenzleiste visualisieren den aktuell betrachteten refokussierbaren Bereich. Der blaue Abschnitt zeigt die Bereiche des Bildes, die näher an der Kamera liegen. Die Bereiche des Bildes die weiter von der Kamera entfernt sind, werden orange dargestellt. Jeder Balken stellt dabei einen Teil der Tiefe des refokussierbaren Bereichs dar und wird als Tiefenschritt bezeichnet. Je heller die Darstellung der Balken auf dem Display ist, desto schärfer kann ein Objekt refokussiert werden. Außerdem werden dem Nutzer die refokussierbaren Bereiche des Bildes über Peaking, d.h. durch farbliche Einfärbung der Objektanten, in der Live-Ansicht angezeigt. Die farbliche Einfärbung hängt von der Lage der Objektkante ab. Im Nahbereich werden sie blau und im Fernbereich orange gefärbt.



Abbildung 29: Ansicht der Assistenzleiste nach Betätigung des Lytro-Buttons <sup>112</sup>

Desweiteren bietet die Lytro eine Tiefenanalyse in Echtzeit, die in einem Tiefenhistogramm und einer Tiefenüberlagerung dargestellt werden. Beide zeigen Information über das Motiv und die relative Lage zum Refokusbereich. Das Tiefenhistogramm beschreibt die Verteilung der Tonwerte innerhalb des Schärfebereichs. Die Ausdehnung des Tiefenhistogramms wird auf dem Display rechts neben den Fokusbalken eingeblendet. Je höher der Ausschlag des Histogramms ist, desto besser kann auf die Tiefe refokussiert werden. Für gute Refokussierungsergebnisse sollten sich die Histogrammwellen innerhalb des refokussierbaren Nah- und Fernbereichs befinden. In der Praxis erfordert die optimale Einstellung auf ein Motiv etwas Zeit und Übung, um die Objekte einer Szene in die gewünschten Schärfebereiche zu positionieren. <sup>113 114 115</sup>

<sup>112</sup> Quelle: Lytro Illum User Manual, S.35

<sup>113</sup> Lytro Inc; Consutecc GmbH: Lytro Illum, Datenblatt, [http://www.consutecc.com/images/pdf/LytrO\\_ILLUM\\_Datenblatt.pdf](http://www.consutecc.com/images/pdf/LytrO_ILLUM_Datenblatt.pdf), S.1 ff.

<sup>114</sup> Vgl. Profifoto Spezial 141, Sonderheft für professionelle Fotografie „Lytro Illum“, S.3 ff.

<sup>115</sup> Vgl. Marczok Michael: Lichtfeld in der Studiopraxis, digit!, Das Profimagazin für Digitale Bilder, Ausgabe 2-2015, S.41 f.

## 4.3 Verwendete Software für die Bildverarbeitung

### 4.3.1 Lytro Desktop

„Lytro Desktop“ ist die hauseigene Software der Firma Lytro. Mit dieser Software lassen sich die Lichtfeldaufnahmen verwalten und bearbeiten. Die entstandenen Aufnahmen können in Bibliotheken und Alben angelegt und organisiert werden. Die wichtigsten Elemente der Software sind in Abbildung 30 in drei Bereiche geteilt. Der mit 1 gekennzeichnete Bereich stellt die Menüleiste der Software dar, in der beispielsweise der Import und Export vollzogen werden kann. Im zweiten Bereich werden dem Nutzer verschiedene Ansichtsmöglichkeiten geboten. Hier kann zwischen Miniatur-, Bild-, Filmstreifendarstellung und Vollbildmodus ausgewählt werden. Über den mit 3 gekennzeichneten Bereich kann der gewünschte Arbeitsbereich ausgewählt werden.

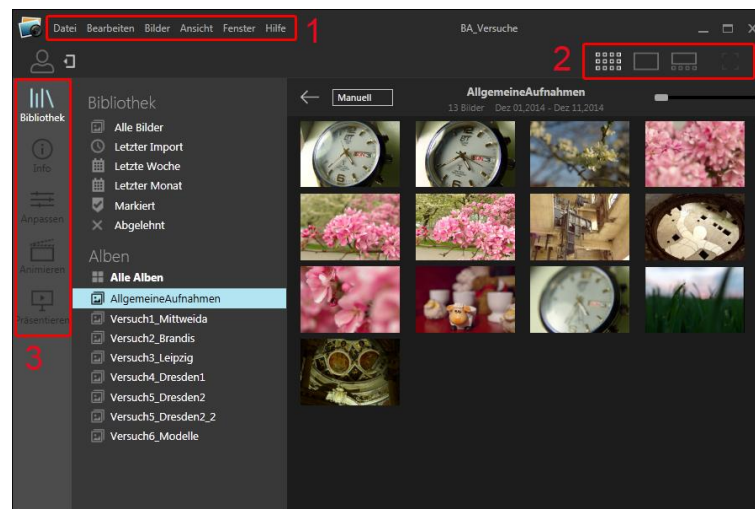


Abbildung 30: Übersicht Lytro Desktop, 1) Menüleiste, 2) Ansichtsmöglichkeiten 3) Auswahl der Arbeitsbereiche<sup>116</sup>

Unterteilt ist dieser Bereich in [Bibliothek], [Info], [Anpassen], [Animieren] und [Präsentieren]. Mit der Betätigung der Buttons ändert sich die Darstellung des grau unterlegten Seitenfensters. Unter dem Punkt „Bibliothek“ werden die Alben der Bibliothek in einer Übersicht angezeigt. Dieser Punkt dient hauptsächlich der Navigation und der Organisation der Bilder. Unter „Info“ können die Metadaten der Daten ausgelesen werden. Diese beinhalten Informationen über das verwendete Kameramodell und die Einstellungen, die für die Aufnahme getroffen wurden. Im Detail beinhaltet dass die Verschlusszeit, ISO-Wert, Belichtungskorrektur, Brennweite und den verwendeten Belichtungsmodus. Bei Betätigung des „Anpassen“ Buttons öffnet sich in dem Seiten-

<sup>116</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

fenster eine Vielzahl von Einstellungsmöglichkeiten, die bereits aus Fotobearbeitungsprogrammen bekannt sind. So wird dem Nutzer ein Histogramm eingeblendet und weitere Fenster, mit denen sich beispielsweise Änderungen am Weißabgleich, am Kontrast und an der Sättigung machen lassen. Neu in den Einstellungsmöglichkeiten ist das Bearbeiten der virtuellen Kamera. Der Nutzer kann hier Einfluss auf die Blende der Aufnahme nehmen und diese im Bereich von  $f/1$  bis  $f/16$  variieren. Ebenso kann die Fokusebene der Aufnahme verlagert und ausgedehnt werden. Als Hilfsmittel dafür können Tiefenkarten in der Fotografie eingeblendet werden, um die Lage der Objekte im Bezug auf die Entfernung zur Kamera, farblich hervorzuheben. Unter dem „Animieren“ Button öffnet sich ein besonderes Feature Software. Hier können die Lichtfeldaufnahmen beispielsweise mit einer Schärfenverlagerung oder einer Bewegung über die Fotografie animiert werden.

Lytro Desktop bietet die Möglichkeit, über den Menüpunkt „Ansicht“ die aufgenommen Bilder in Rot/Cyan 3D oder als Side-by-Side zu betrachten. Der Nachteil ist, dass kein Einfluss auf erzeugte stereoskopische Bild genommen werden kann und die Disparitäten von der Software festgelegt werden. Wahrscheinlich handelt es sich bei den beiden Bildern um die beiden äußeren Teilapertur-Bilder, die vollständig von der Kamera aufgezeichnet wurden.<sup>117</sup>

### 4.3.2 Stereo Photo Maker und Stereo Movie Maker

„Stereo Photo Maker“, kurz SPM, ist ein kostenfreies Bildbearbeitungsprogramm für stereoskopische Bilder. Es unterstützt Bildmaterial in den weitverbreiteten Formaten wie JPEG, JPS, TIF und PNG. Mit dieser Software können stereografische Bildpaare in verschiedenen Ansichten, wie zum Beispiel Side-by-Side oder Anaglyph angezeigt werden. Ebenso können die bearbeiteten Bilder für das gewünschte Vorschauverfahren exportiert werden. Mit „Stereo Photo Maker“ können diverse Bildmanipulationen durchgeführt und somit der gewünschte 3D-Effekt erzielt werden. Die Bildmanipulationen lassen sich per Hand oder automatisiert ausführen. Es bietet die Möglichkeit, diverse Korrekturen an den Einzelbildern der Stereobildpaare vorzunehmen. Mit der Software können Höhenfehler zwischen den Bildern ausgeglichen oder Trapezkorrekturen ausgeführt werden, um entstandene Justagefehler zu beheben. Ebenso ist eine farbliche Anpassung der Einzelbilder ausführbar.<sup>118</sup>

Das Äquivalent für stereographischen Videomaterial ist der „Stereo Movie Maker“, kurz SMM. Mit SMM kann stereoskopisches Material in verschiedenen Darstellungsmetho-

---

<sup>117</sup> Vgl. Lytro Support: Lytro Desktop, Main Overview, <https://support.lytro.com/hc/en-us/articles/202590364-Lytro-Desktop-4-Main-Overview>

<sup>118</sup> Vgl. StereoPhoto Maker, Homepage, <http://stereo.jpn.org/ger/stphmkr/index.html>

den anzeigen und bearbeiten. Bildkorrekturen oder Korrekturen an der Ausrichtung können innerhalb der Software über den gesamten Film oder auf festgelegten Einzelbildern vornehmen. Ebenso ist ein Export der fertiggestellten Videos in verschiedenen Stereoformaten möglich.<sup>119</sup>

## 4.4 Überlegungen vor der Durchführung

Ziel des Versuchs ist es, stereoskopische Sequenzen aus einer Lichtfeld-Handkamera zu erstellen. Wie in den Grundlagen für die Stereoskopie beschrieben sind dazu zwei Bilder notwendig. Ein Teilbild ist für das linke Auge und eins für das rechte Auge bestimmt. Beide Bilder müssen Disparitäten aufweisen, damit ein räumlicher Eindruck bei der Betrachtung entsteht. Für die Erstellung der Sequenzen werden also zwei voneinander getrennte Videos gebraucht. Die Videos entstehen durch eine Bildreihe, die Bild für Bild zusammengefügt werden. Bei den Recherchen zu der Versuchsdurchführung, ergaben sich Informationen darüber, dass ein Exportieren der Daten als Stereobild in Lytro Desktop möglich ist. Diese Stereobilddatei muss für die Weiterverarbeitung in zwei einzelne Bilder getrennt werden. Aus diesem Grund erfolgt für die Bearbeitung mit unterschiedlichen Programmen.

---

<sup>119</sup> Vgl. StereoMovie Maker, Homepage, <http://stereo.jpn.org/ger/stvmkr/index.html>

## **5 Versuchsdurchführung Stereo 3D**

In diesem Kapitel werden die einzelnen Arbeitsschritte dokumentiert, die für das erstellen der stereoskopischen Sequenzen notwendig waren. Im ersten Schritt werden die aufgenommenen Motive und die Herangehensweise vor Ort beschrieben. In den folgenden Unterpunkten wird auf die Organisation und Verwaltung der Daten eingegangen. Den Hauptbestandteil bildet die Dokumentation der einzelnen Arbeitsschritte für die Stereobildgewinnung. Dabei werden auch die Teilschritte in den verwendeten Programmen erläutert. Die entstandenen Sequenzen sind auf der DVD gespeichert. Für die Betrachtung der Sequenzen auf einem Standardmonitor, ist Anaglyphbrille beigelegt.

### **5.1 Motivbeschreibung und die Vorgehensweise vor Ort**

In dem folgenden Abschnitt werden die ausgewählten Motive für die Versuchsdurchführung beschrieben. Außerdem werden die eingestellten Parameter der Kamera aufgezeigt und die Vorgehensweise bei der Einrichtung des Motivs erläutert. Die kameraspezifischen Eigenschaften wurden aus der Software Lytro Desktop ausgelesen und werden folgend mit dokumentiert.

#### **5.1.1 Das Motiv für die Sequenz „Wolkenzug“**

Die Sequenz Wolkenzug zeigt einen einzelnen Strauch im Vordergrund. Den Hintergrund bildet ein weitläufiges Feld. In der Sequenz sieht man schnell ziehende Wolken. Da bekanntlich die maximalen perspektivischen Unterschiede einer Lichtfeldkamera durch den Linsendurchmesser begrenzt sind, kann keine große Stereobasis erreicht werden. Die stereoskopischen Abbilder sind in großer Entfernung nahezu identisch und der 3D-Effekt ist sehr gering. Für die Aufnahme weiter Landschaften wäre eine viel größere Stereobasis notwendig.



Abbildung 31: Einzelbild aus der Sequenz „Wolkenzug“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild<sup>120</sup>

Damit dieses Bild einen sichtbaren 3D-Effekt erhält ist das Motiv so gewählt, dass der Strauch den Vordergrund bildet. Die Tiefenwahrnehmung entsteht hier hauptsächlich durch den Horizont und die Verdeckung des Hintergrunds durch den Strauch. Vor Ort wurde die Kamera auf einem Fotostativ angebracht und entsprechend der vorherrschenden Lichtverhältnisse eingestellt. Die Verschlusszeit wurde bei dieser Aufnahme, im manuellen Modus, auf 1/500 s und der ISO-Wert auf 100 eingestellt. Dadurch hat sich automatisch eine Belichtungskorrektur von +1,6EV ergeben. Bevor das Bild aufgenommen wurde, war es notwendig die richtige Position zu finden, damit eine spätere Refokussierung vom Vordergrund zum Hintergrund möglich ist. Da innerhalb der Lichtfeldkamera von Lytro der Schärfentiefebereich nicht über die Blende gesteuert werden kann, sind ein großer Abstand zum Strauch im Vordergrund und eine große Brennweite notwendig. Die gewählte Brennweite für diese Aufnahme beträgt 124 mm und der Abstand ca. 9 m bis 10 m. So wurde sichergestellt, dass der Strauch im positiven und der Horizont im negativen Schärfebereich liegt. Nachdem die richtige Position gefunden war und die Kamera eingestellt wurde, erfolgte die Aufnahme der Einzelbilder.

### 5.1.2 Das Motiv für die Sequenz „Sonnenuntergang“

In der Szene ist ein Ast des zuvor aufgenommenen Strauchs in einer nahen Einstellung zu sehen. Das Motiv wurde zu einem späteren Zeitpunkt fotografiert und soll die Abbildung bei schwierigeren Lichtbedingungen zeigen. Im Vordergrund ist der Ast mit Blättern zu sehen. Den Hintergrund bilden der weite Horizont mit ziehenden Wolken und die untergehende Sonne.

---

<sup>120</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Lytroaufnahme, „Wolkenzug“



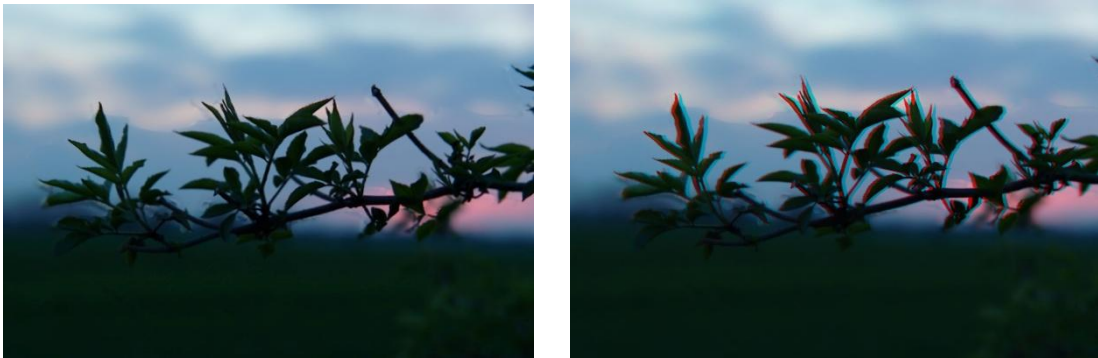


Abbildung 32: Einzelbild aus der Sequenz „Sonnenuntergang“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild<sup>121</sup>

Die Sequenz wurde statisch von einem Fotostativ aufgenommen. Damit beim Auslösen der Kamera kein verwackeltes Bild entsteht, wurde zuvor der Selbstauslöser der Kamera aktiviert. Die Verschlusszeit für diese Aufnahme wurde durchgehend auf 1/100 s eingestellt. Für ein geringes Bildrauschen wurde der ISO-Wert 200 gewählt. Daraus hat die Kamera eine Belichtungskorrektur von +0,1EV berechnet. Die Brennweite beträgt 90 mm.

### 5.1.3 Das Motiv für die Sequenz „Skulptur“

Die Sequenz „Skulptur“ ist an der Brühlschen Terrasse in Dresden entstanden. Im Vordergrund des Bildes ist eine Skulptur zu sehen, die sich vor einem Zaun befindet. Im Hintergrund sind eine Laterne und Baumkronen zu sehen. Das Motiv in dieser Szene soll eine nahe Einstellung und die 3D-Wirkung mit einer Lichtfeldkamera zeigen.

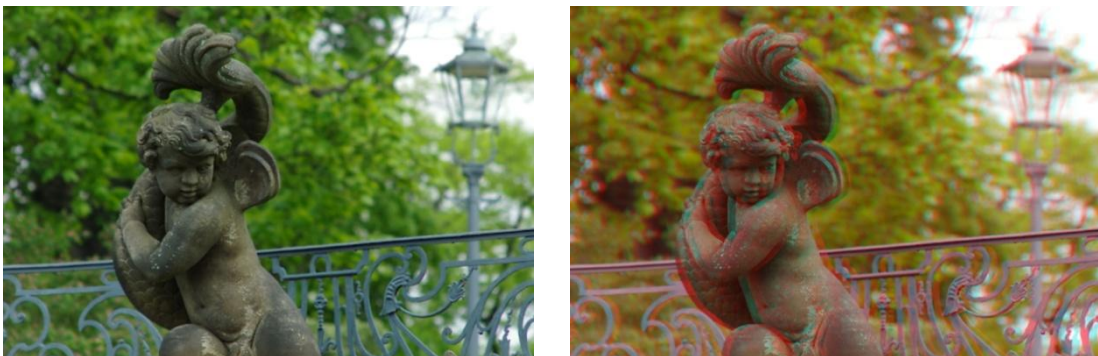


Abbildung 33: Einzelbild aus der Sequenz „Skulptur“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild<sup>122</sup>

<sup>121</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Lytroaufnahme, „Sonnenuntergang“

<sup>122</sup> Quelle: Fechner, Philipp; Eichler, Jeremias: Lytroaufnahme, „Skulptur“



Die einzelnen Bilder für die Sequenz wurden im manuellen Modus fotografiert. Die Bilder wurden 1/320 s bei einer ISO von 80, belichtet. Die Belichtungskorrektur wurde durch die Kamera selbst auf +0,6EV festgelegt. Die Entfernung zu der Skulptur war durch den Umfang des davorliegenden Brunnen begrenzt und beträgt ca. 8 m. Um die Skulptur dennoch nah abbilden zu können, wurde eine Brennweite von 232 mm eingestellt. So war bereits, durch die Gegebenheiten vor Ort, der refokussierbare Schärfentiefebereich entsprechend groß. Die Spanne des refokussierbaren Bereichs erstreckt sich bei dieser Brennweite von ca. 8 m bis zur optischen Unendlichkeit. Der Fokus wurde so gelegt, dass der entfernteste Tiefenschritt des negativen Schärfenbereichs auf der optischen Unendlichkeit liegt. Dadurch lag die Skulptur im positiven Schärfenbereich der Kamera. In der Sequenz wird eine Kamerafahrt nach links vollzogen, wodurch sich das Objekt im Vordergrund nach rechts bewegt. Um diese seitlich gerichtete Bewegung zu realisieren, wurde die Kamera auf einem selbstgebauten Slider angebracht, der auf zwei Malerböcken abgestellt wurde. Um ein Verwackeln zu vermeiden, wurde der Selbstauslöser der Kamera eingestellt, wodurch die Auslösung nach Ablauf von zwei Sekunden erfolgte. Nach der Auslösung wurde der Slider einen Zentimeter seitlich verschoben und erneut ausgelöst.

#### 5.1.4 Das Motiv für die Sequenz „Netzlampe“

In dieser Sequenz sind zwei hintereinander liegende Lampen zu erkennen, deren Lampenschirme eng verflochten sind. Die Bildreihe ist in Dresden am Postplatz entstanden und wurde bei Nacht aufgenommen. In der Sequenz ist zuerst die hintere der beiden Lampen zu sehen. Durch eine nach rechts gerichtete Bewegung der Kamera gelangt die vordere zweite Lampe in den Bildausschnitt. Die Umsetzung dieser Szene soll die Abbildung sehr detailreicher Bilder zeigen.

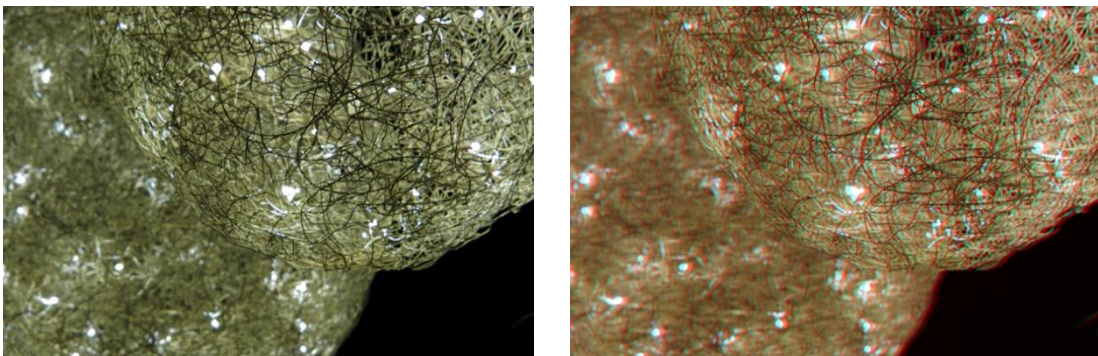


Abbildung 34: Einzelbild aus der Sequenz „Netzlampe“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild<sup>123</sup>

---

<sup>123</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Lytroaufnahme, „Netzlampe“

Die Bilder für diese Sequenz wurden im manuellen Belichtungsmodus der Lytro Illum fotografiert. Die Belichtungszeit für diese Aufnahme beträgt 1/30 s und der ISO-Wert 200, wodurch sich eine Belichtungskorrektur von +0,1EV ergibt. Die Entfernung zwischen Kamera und den Objekten liegt ungefähr bei 3 m. Die Brennweite für diesen Bildausschnitt wurde auf 127 mm eingestellt, da vor Ort keine Möglichkeit bestand, die Kamera mit Zusatztechnik näher an das Objekt zu bringen. Auch in diesem Bild wurde die Brennweite so gewählt, dass eine nachträgliche Fokusverlagerung auf die beiden Lampen möglich ist. Der Fokus wurde so eingerichtet, dass die hintere Lampe im negativen und die vordere Lampe im positiven Bereich der möglichen Refokussierung liegt. Die Aufzeichnung der einzelnen Bilder erfolgte auch in diesem Fall wieder über die interne Selbstauslösung der Kamera. Nachdem ein Bild aufgenommen war, wurde der Slider um einen Zentimeter seitlich verschoben und das nächste Bild aufgenommen.

### 5.1.5 Das Motiv für die Sequenz „Treppengang“

Die Szene „Treppengang“ ist in Dresden am Georg-Treu-Platz, in Zusammenarbeit mit Jeremias Eichler, entstanden. Es zeigt die Verzierungen der Treppe, die zu den Elbterrassen führt. Im Hintergrund ist die Fassade der Museums Festung Dresden zu sehen. Das Motiv soll eine architektonische Aufnahme demonstrieren.



Abbildung 35: Einzelbild aus der Sequenz „Treppengang“ Links: exportiertes 2D-Bild Rechts: exportiertes Color-Anaglyph-Bild<sup>124</sup>

Die Kamera wurde manuell auf eine Belichtungszeit von 1/50 s und einen ISO-Wert von 80 eingestellt. Die Belichtungskorrektur ergab automatisch +1,3EV. Die Lichtfeldkamera wurde auf den selbstgebaute Slider montiert und in einer Entfernung von ca. 1m zur Treppenverzierung aufgestellt. Die Brennweite für diesen Bildausschnitt beträgt 90 mm.

---

<sup>124</sup> Quelle: Fechner, Philipp; Eichler, Jeremias: Lytroaufnahme, „Treppengang“

## 5.2 Gewinnung der Einzelbilder für die stereoskopischen Sequenzen

Die folgenden Kapitel dokumentieren die Arbeitsschritte, die für die Bildgewinnung angewendet wurden. Ebenso wird auf die Organisation der Datenmenge und das verwendete Dateiformat eingegangen. Im nächsten Schritt wird darauf eingegangen, wie die Daten in „Lytro Desktop“ organisiert wurden. Folglich sind die Arbeitsschritte für den Export der Daten und die Teilbildtrennung dokumentiert.

### 5.2.1 Speicherung der Rohdaten und das verwendete Dateiformat

Nach jeder Aufnahmesession wurde das entstandene Material von der SD-Karte auf eine Festplatte kopiert. Dabei wurde jede Session einem eigenen Ordner zugewiesen und nach dem Aufnahmeort und dem Aufnahmedatum benannt. Während des Zeitraums, in dem die Kamera zur Verfügung stand, sind insgesamt 115 Gigabyte Rohmaterial entstanden. Eine einzelne Aufnahme hatte im Durchschnitt 104 Megabyte, aufgrund des zuvor ausgewählten Dateiformats Lytro XRAW. Lytro XRAW ist eine Lichtfeldbilddatei. Eine solche Datei enthält das rohe Lichtfeldbild und sogenannte Pairingdaten. Die Pairing Daten werden von der Software benötigt um die kamerainternen Kalibrierungsdateien auszulesen. Die Verwendung von Lytro XRAW erspart dem Nutzer die Kopplung der SD-Karte mit der eigenen Version von „Lytro Desktop“, die beim ersten Importieren von SD-Karte ausgeführt werden kann. Der Vorteil dieses Dateiformates ist, dass die Lichtfeldrohdaten auf jedem anderen Computer, der mit einer Lytro Desktop-Version ausgestattet ist, in bester Qualität importiert und angesehen werden kann. Der Nachteil besteht darin, dass die entstehenden Dateien doppelt so groß sind als die Lytro Raw-Dateien. Das hat ebenfalls den Effekt, dass die Kamera doppelt so viel Zeit für das Schreiben der Daten braucht. Ab der Version 4.1 können XRAW – Dateien nachträglich aus „Lytro Desktop“ exportiert werden.<sup>125 126</sup>

### 5.2.2 Verwaltung und Import der Rohdaten in Lytro Desktop

Um die Lichtfeldrohdaten einsehen und bearbeiten zu können, muss mit der hauseigenen Software „Lytro Desktop“ gearbeitet werden. Der erste Schritt bestand darin, eine neue Bibliothek an dem gewünschten Zielort zu erstellen. Das erfolgt über den Menüpunkt „Datei“ und das Anwählen der dort aufgeführten Option „Neue Bibliothek“. Dar-

---

<sup>125</sup> Vgl. Lytro Illum User Manual, All Chapters, S.38

<sup>126</sup> Vgl. Lytro Support: LYTRO ILLUM, Camera and On-Camera Software, <https://support.lytro.com/hc/en-us/sections/200358150-LYTRO-ILLUM-Camera-and-On-Camera-Software>

aufhin öffnet sich ein Fenster, in dem der gewünschte Dateipfad ausgewählt werden kann. In der angelegten Bibliothek können die aufgenommenen Lichtfeldbilder in verschiedenen Alben organisiert werden. Das Importieren der Daten erfolgt ebenfalls über den Menüpunkt „Datei“, dort findet man die „Importieren“-Zeile, die dem Nutzer verschiedene Unterpunkte anbietet. In diesem Fall wurde der Unterpunkt „aus dem Ordner...“ gewählt und nacheinander die zuvor angelegten Versuchsordner mit den Rohdaten in die Software eingeladen, wie in der folgenden Abbildung dargestellt.

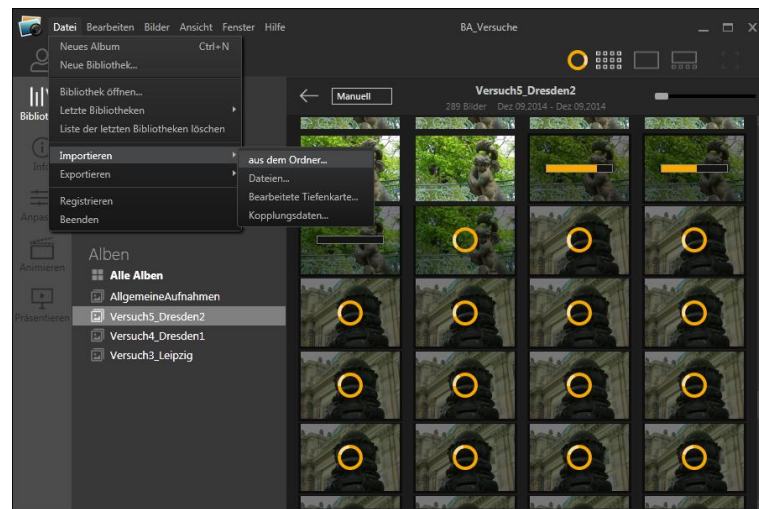


Abbildung 36: Importieren der Rohdaten, Screenshot von Lytro Desktop<sup>127</sup>

Jeder Aufnahmesession, die zuvor in einem Ordner angelegt wurden, ist in „Lytro Desktop“ einem eigenem Album zugeordnet worden. Das Einladen der Daten braucht einige Zeit, da jedes Bild lokal in den Bibliothekordner kopiert wird. Nachdem das gesamte Footage eingeladen ist, können die Bilder in der Bibliothekansicht zwischen den Alben verschoben und umorganisiert werden.

### 5.2.3 Export der Daten als Side-by-Side-Bilder und Trennung der Bilder für die weitere Bearbeitung

Der nächste Schritt nach dem Importieren und der Organisation der Alben bestand im Exportieren der Einzelbilder für die folgende Teilbildgewinnung. Der Export der Daten wurde Album für Album durchgeführt. Dazu wurde in der Miniaturansicht das erste Bild der Sequenz markiert und mit gehaltener Shift-Taste das letzte Bild angewählt. Dadurch werden alle dazwischenliegenden Einzelbilder ausgewählt. Mit einem Rechtsklick auf ein markiertes Bild öffnet sich ein Fenster, in dem unter anderem die

<sup>127</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

Exportieren-Funktion zu finden ist. Alternativ kann man über die Menüleiste „Datei“ und „Exportieren“ zum gleichen Ziel gelangen.

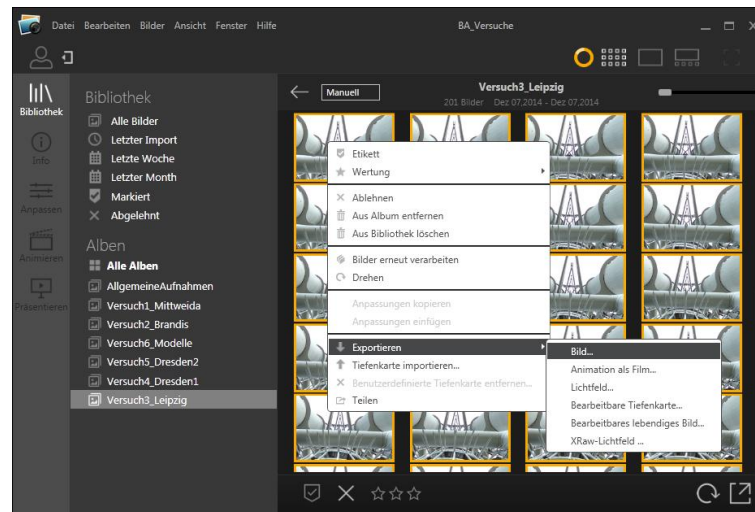


Abbildung 37: Screenshot der Exportmöglichkeiten in „Lytro Desktop“ <sup>128</sup>

Hier werden dem Nutzer verschiedene Exportmöglichkeiten angeboten. In diesem Fall wurde die Option „Bild...“ gewählt. Danach öffnet sich ein Fenster, in diesem kann der gewünschte Zielordner und der Dateityp ausgewählt und der Dateiname vergeben werden. Als Dateityp wurde Stereo-JPEG (\*jps) eingestellt. Nach der Bestätigung der Einstellungen beginnt das Programm mit dem Exportieren der ausgewählten Bilder.

Das JPS-Format, auch als JPEG Stereoscopic bekannt, ist ein Dateiformat speziell für 3D-Bilder. Eine JPS-Datei bildet sich aus zwei nebeneinander liegenden JPEG-Bildern. Zusätzlich enthält der Binärkode einen Marker, der dem 3D-Viewer die Trennungslinie der beiden Bilder zu erkennen gibt. <sup>129</sup>

Für die Erstellung der endgültigen stereoskopischen Sequenzen sind jeweils ein Video für das linke Auge und ein Video für das rechte Auge notwendig. Um die Videos für das jeweilige Auge anfertigen zu können, mussten im nächsten Arbeitsschritt die Einzelbilder zuvor exportierten JPS-Datei voneinander getrennt werden, um sie in eine linke und rechte Videosequenz zusammenzufügen. Die Trennung der JPS-Dateien erfolgte in der kostenfreien Software „Stereo Photo Maker“. „SPM“ bietet umfassende Möglichkeiten in Bearbeitung stereoskopischer Fotos. Ein großer Vorteil, der sich durch SPM ergab, war die Nutzung der integrierten Stapelverarbeitung. Mit der Stapelverarbeitung konnte die Vielzahl an Einzelbildern zeitsparend verarbeitet werden. Die Stapelverarbeitung lässt sich über den Menüpunkt „Datei“ aufrufen.

<sup>128</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

<sup>129</sup> Vgl. Anaglyphe, 3D Bilder, -Games und -Videos zum anfassen nah, <http://www.anaglyphe.de/die-3d-dateiformate-mpo-und-jps/958> (21.06.2015)



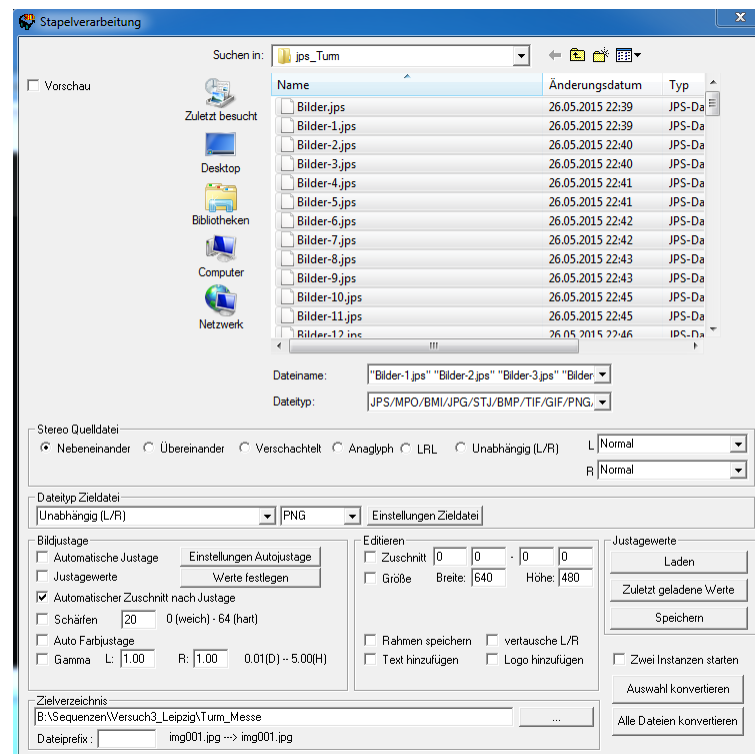


Abbildung 38: Screenshot Stereo Photo Maker- Einstellungen für die Stapelverarbeitung<sup>130</sup>

Wie in Abbildung 38 dargestellt, öffnet sich darauffolgend ein Fenster, in dem die Einstellungen für die Stapelverarbeitung durchgeführt werden können. Als erstes navigiert man an den gewünschten Quellordner und wählt dann die Dateien aus, die verarbeitet werden sollen. Das kann mit der Tastenkombination Strg+A geschehen. Wenn sich keine weiteren Dateien in dem Ordner befinden, die nichts mit der Stapelverarbeitung zu tun haben, können alle Dateien über den Button „Alle Dateien konvertieren“ verarbeitet werden. Im Vorfeld sind alle benötigten Einstellungen für den Export zu treffen. Der zweite Schritt bestand darin, die stereoskopische Quelldatei zu definieren. Die Definition hängt vom verwendeten Material ab. In diesem Fall wurde die Quelldatei mit „Nebeneinander“ festgelegt, da JPS-Dateien bekanntlich zwei nebeneinander liegende Bilder beinhalten. Als nächstes wurde der Dateityp der Zieldatei festgelegt. Das Ziel war es, die stereoskopischen Teilbilder zu gewinnen. Aus diesem Grund wurde über den Reiter „Unabhängig(L/R)“ ausgewählt und das Ausgabeformat auf PNG festgelegt. Stereo Photo Maker bietet noch weitere Justageoptionen an, die allerdings für den Versuch keine Relevanz haben. Als letztes wurde der Zielordner bestimmt. Über die Schaltfläche „Auswahl konvertieren“ wird die Stapelverarbeitung ausgeführt. Die exportierten Dateien werden durch SPM umbenannt. Die getrennten Teilbilder werden mit dem Zusatz \_l für das linke und \_r für das rechte Teilbild gekennzeichnet. Die Stapelverarbeitung wurde für jedes Motiv und deren Bildreihen einzeln ausgeführt.

<sup>130</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

## 5.3 Erstellung der stereoskopischen Sequenzen

In diesem Kapitel wird der generelle Workflow für die Erstellung der Teilsequenzen und der endgültigen stereoskopischen Sequenzen erläutert. Es werden Komplikationen bei der Fertigstellung erläutert und die Beseitigung entstandener Fehler dokumentiert. Die Vorgehensweise wird allgemein beschrieben, da eine Beschreibung für alle Motive nicht zielführend wäre. Alle Schritte sind individuell auf die jeweilige Szene angewandt worden. Für die Betrachtung der endgültigen Clips sind die fertigen Sequenzen sowohl im Side-by-Side-Format als auch im Anaglyphverfahren gespeichert worden. Damit ist sichergestellt, dass die Resultate auch ohne 3D-fähige Wiedergabegeräte angesehen werden können.

### 5.3.1 Anfertigung der Teilbildsequenzen

Das Zusammenfügen der Teilbildsequenzen erfolgte im Programm Adobe After Effects. After Effects ist eine Compositing- und Animationssoftware, in der sich Eigenschaften von Film- und Bildmaterial sowie Effekte entlang der Zeitachse animieren und ändern lassen. After Effects bietet die Möglichkeit, die zuvor angefertigten Bildreihen in einer Sequenz zu importieren. Über „Datei“, „Importieren“ und „Datei...“ öffnet sich das Importfenster. Hier kann der Dateipfad angegeben werden, in dem die von SPM erstellten, getrennten Bilder abgelegt wurden. Im Vorfeld bietet es sich an, die linken und rechten Teilbilder in einem eigenen Ordner abzulegen. Zum einen für die eigene Übersicht und zum anderen, um sicher zu gehen, dass kein linkes Teilbild in der rechten Sequenz landet und umgekehrt. Im Importfenster von After Effects, kurz AE, wählt man das erste Bild der Bildreihe an und setzt einen Haken in den Sequenzoptionen bei „PNG-Sequenz“, wie in Abbildung 39 dargestellt. Als nächstes legt man unter „Importieren als:“ „Footage“ fest und vergibt den Dateinamen. After Effects fügt automatisch alle Bilder, in numerischer Reihenfolge, zusammen. Der nächste Schritt besteht darin, eine neue Komposition zu erstellen. Unter dem Menüpunkt „Komposition“ und „Neue Komposition...“ öffnet sich ein Fenster, in dem die Eigenschaften der Komposition eingestellt werden können. Als erstes wurde der Kompositionsname vergeben und im Anschluss die Auflösung, die Framerate und die Dauer der Komposition festgelegt. Die getrennten Bilder aus SPM hatten eine Auflösung von 2450x1634 Pixeln, die PNG-Sequenz in After Effects hat eben diese Auflösung übernommen. Die Komposition wurde auf eine Auflösung von 1920x1080 Pixeln angelegt, was dem heutigen HD-Standard entspricht. Der Pixelunterschied zwischen Kompositions- und Sequenzauflösung hält etwas Spielraum bereit und die Sequenz kann später niedriger skaliert werden.

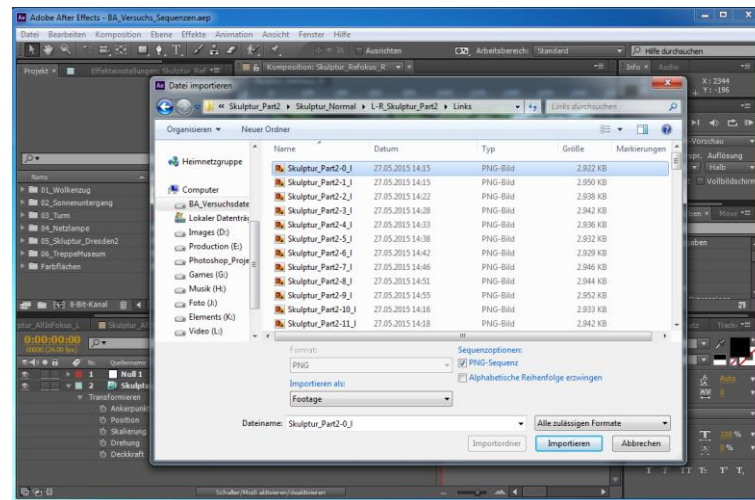


Abbildung 39: Screenshot des Importfensters von After Effects<sup>131</sup>

Die Framerate wurde auf 25 Bilder pro Sekunde eingestellt und die Dauer auf vier Sekunden, da maximal 100 Bilder pro Bildreihe entstanden sind. Die PNG-Sequenz kann mittels Drag & Drop in die Zeitleiste der Komposition eingefügt werden. Der Import der PNG-Sequenzen und die Erstellung der Kompositionen wurden für alle linken und rechten Teilsequenzen wiederholt.

### 5.3.2 Schwierigkeiten und entstandene Fehler

Bei der ersten Betrachtung der zusammengeführten Videos ist aufgefallen, dass alle Bildreihen die mit dem selbstgebauten Slider aufgenommen wurden, teilweise sehr große Sprünge zwischen den einzelnen Bildern zeigten. Das macht die Sequenzen sehr unansehnlich und unsauber, was gerade bei stereoskopischen Videos eine störungsfreie Betrachtung unmöglich macht. Diese Fehler sind entstanden, obwohl der Slider genau entlang eines Maßbandes seitlich verschoben wurde. Die großen Sprünge in den Bildfolgen sind durch einer Drehbewegung des Schlittens auf der Schiene hervorgerufen wurden. Der Grund dafür ist, dass der Schlitten zu viel Spiel in der Schiene hatte. Dieser Fehler ist während der Aufnahmen und bei der Sichtung der Bilder nicht bemerkt worden. Das Problem zeigte sich erst beim Abspielen der zusammengeführten Sequenzen. Hinzukommt das die seitliche Verschiebung mit einem Zentimeter zu groß gewählt war. Zur Demonstration enthält die beiliegende DVD zwei Beispiele.

<sup>131</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation



### 5.3.3 Fehlerkorrektur

Eine Fehlerkorrektur in Adobe After Effects wurde durchgeführt, indem hier entlang der Zeitachse eine framegenaue Änderung der Position erfolgte. Die Fehlerkorrektur war durch zwei Tatsachen begünstigt. Zum einen ist die Kompositionsauflösung kleiner als die Bildauflösung der PNG-Sequenz. Hätten beide die gleiche Auflösung, würden bei einer Änderung der Position schwarze Ränder im Video entstehen. Dem kann zwar durch Hochskalieren des Footage entgegengewirkt werden, das hätte allerdings eine Minderung der endgültigen Qualität zu Folge. Der zweite und wichtigere Umstand ist, dass die Einzelbilder aus ein und demselben Gerät aufgenommen wurden. Dadurch entsteht der Fehler in beiden Teilbildern gleichermaßen. Das heißt, wenn die Korrektur beispielsweise für das linke Teilbild gemacht wird, kann diese Korrektur genauso auf das rechte Teilbild angewandt werden. Somit halbiert sich der Aufwand.

Die Fehlerkorrektur in After Effects gestaltete sich als aufwendig, da sie für jedes Motiv individuell angewandt werden musste. Als erstes wurde ein sogenanntes Null-Objekt der Komposition zugefügt. Das ist eine verborgene Ebene, die genau wie andere Ebenen in ihren Basiseigenschaften (Position, Skalierung, Drehung,...) verändert werden kann. Dieses Null-Objekt wurde als übergeordnete Ebene der PNG-Sequenz festgelegt. Das hat zur Folge, dass sich Transformationseigenschaften der PNG-Sequenz relativ zu den Transformationseigenschaften der übergeordneten Ebene verhalten. Wird das Nullobjekt beispielsweise um fünf Pixel verschoben, bewegt sich ebenfalls die untergeordnete PNG-Sequenz um fünf Pixel in die gleiche Richtung. Um die Bildsprünge zu beheben, mussten die Sequenzen Bild für Bild angepasst werden. Dazu wurde der Komposition an eine markante und kontrastreiche Stelle im Bild eine horizontale Hilfslinie hinzugefügt. In jedem darauffolgenden Bild wurde diese Stelle an der Hilfslinie ausgerichtet, sofern der ausgewählte Punkt von der Hilfslinie abwich. Die Position kann über die Pfeiltasten beeinflusst werden. After Effects setzt, bei aktivierter Stoppuhr an der Transformationseigenschaft, bei jeder Änderung ein sogenanntes Keyframe, in dem die geänderte Position festgehalten wird. Wenn keine Änderung erfolgt, muss der Keyframe manuell gesetzt werden, da sonst die Änderung zwischen zwei Keyframes über die Zeit angepasst wird. Im zweiten Schritt wurde eine vertikale Hilfslinie an eine markante Stelle im Bild gelegt. Mit jedem folgenden Einzelbild wurde diese Hilfslinie um einen festen Pixelwert seitlich verschoben und die ausgewählte Stelle an der Hilfslinie ausgerichtet. So konnte eine annehmbare, gleichmäßige, seitlich gerichtete Bewegung erzielt werden. Die entstanden Änderungen der Position wurden in dem Null-Objekt als Keyframes festgehalten.

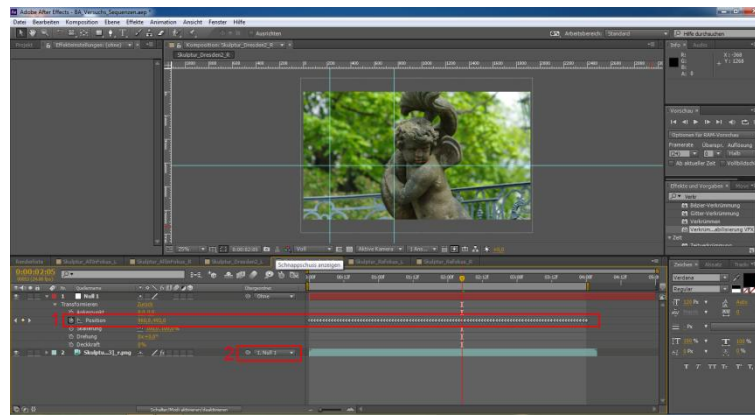


Abbildung 40: Screenshot von After Effects, 1) Positionseigenschaft des Null-Objekts mit aktivierter Stoppuhr 2) Auswahl der übergeordneten Ebene<sup>132</sup>

Nachdem die Positionen editiert sind, kann die Skalierung der PNG-Sequenz so angepasst werden, dass beim Abspielen dieser keine schwarzen Ränder entstehen. Da die Komposition eine kleinere Auflösung hat, kann die PNG-Bildfolge herunter skaliert werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Positionsfehler gleichermaßen sowohl in der rechten als auch in der linken Bildfolge, entstanden, kann das Nullobjekt der linken Videosequenz gleichzeitig für das rechte Video angewendet werden. Dazu ist es möglich, das Null-Objekt in der entsprechenden Komposition zu kopieren. Das Null-Objekt muss dann als übergeordnete Ebene ausgewählt werden. Es ist wichtig, dass die Transformationseigenschaften der PNG-Sequenz danach abgeglichen werden. Dafür bietet es sich an, die Teilsequenz, in der die Änderungen gemacht wurden, als Referenz zu wählen. Die einzelnen Schritte wurden für jedes stereoskopische Paar individuell wiederholt.

### 5.3.4 Anfertigung der stereoskopischen Sequenzen in Side-by-Side und als Color-Anaglyphen

Nachdem die Fehlerkorrektur fertiggestellt war, wurden die linken und rechten Teilsequenzen in After Effects gerendert. Die Videos für das linke Auge wurde mit „...\_L“ und für das rechte Auge mit „...\_R“ gekennzeichnet, damit die Videos beim Zusammenführen der stereoskopischen Sequenzen nicht vertauscht werden. Als Ausgabeformat wurde AVI ausgewählt, da es ohne weiteres von Stereo Movie Maker eingelesen werden kann. In SMM wurden die Teilsequenzen zusammengefügt und anschließend ausgegeben.

<sup>132</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

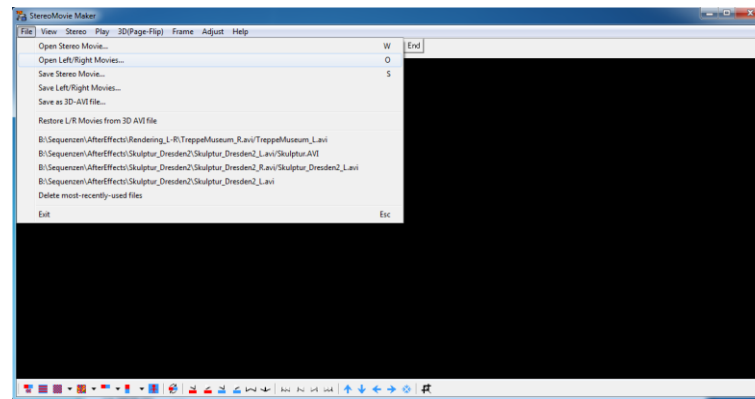


Abbildung 41: Screenshot von Stereo Movie Maker, Import des linken und rechten Videos <sup>133</sup>

Über den Menüpunkt „File“ kann die Option „Open Left/Right Movies...“ angewählt werden (siehe Abbildung 41). Danach öffnet sich ein Fenster in dem man zu dem Ordner der Quelldateien navigieren kann. Interessant ist, dass es „Stereo Movie Maker“ ausreicht, eine der beiden Teilsequenzen anzuwählen, sofern sie den gleichen Namen tragen und jeweils mit „\_L“ und „\_R“ gekennzeichnet sind. Wird die Auswahl bestätigt fragt SMM nach, ob es den anderen Clip als Stereobildpaar einladen soll. Nachdem die Videos importiert sind, sieht man das Material in der sogenannten „Adjustment View“, bei der das Stereobildpaar nebeneinander abgebildet und eine kombinierte Ansicht darunter angezeigt. Für die Betrachtung der Stereowirkung ohne ein 3D-fähiges Wiedergabegerät kann die Ansicht auf die Anaglyphdarstellung umgestellt werden. Für den Versuch wurde SMM genutzt, um den Versatz der Stereobildpaare anzupassen. Die Verschiebung ist ganz unkompliziert über die Pfeiltasten der Tastatur realisierbar. Die horizontale Teilbildausrichtung entspricht einer Änderung der Konvergenz, die allerdings einen seitlichen Überschuss erzeugt. Dieser Überschuss muss in der Postproduktion weggeschnitten und auf die verwendete Auflösung skaliert werden.<sup>134</sup> Im Anschluss an die Teilbildausrichtung wurde die stereoskopische Sequenz exportiert. Die Option findet man unter „File“ und „Save Stereo Movie“, in dem folgenden Fenster kann der Dateiname vergeben und das gewünschte Darstellungsverfahren bestimmt werden. Für den Versuch wurden die stereoskopischen Sequenzen als Color-Anaglyph und im Side-by-Side-Format ausgegeben. Diese Schritte wurden für alle erstellten stereoskopischen Videos wiederholt.

<sup>133</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

<sup>134</sup> Vgl. Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin 2010, S.365

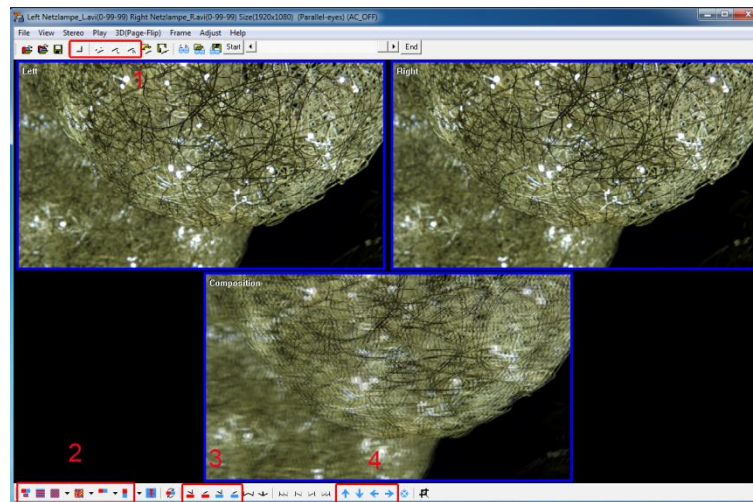


Abbildung 42: Fensteransicht von Stereo Movie und die wichtigsten Steuerelemente, 1) Wiedergabeelemente, 2) Darstellungsverfahren, 3) Framekorrektur bei zeitlich versetzten Bildern, 4) Teilbildverschiebung<sup>135</sup>

## 5.4 Neuausrichtung des Fokus, Schärfentiefausdehnung und perspektivische Verschiebung als gestalterische Möglichkeiten

In dem folgenden Kapitel werden die Möglichkeiten aufgezeigt, die sich für die Postproduktion ergeben. Die nachträgliche Bearbeitung der Lichtfeldbilder wird ebenfalls in stereoskopischen Sequenzen festgehalten. Diese Sequenzen sollen hier in erster die Anwendbarkeit demonstrieren.

### 5.4.1 Arbeitsschritte Fokusneuausrichtung der Refokussesequenzen

Für die Demonstration der Neuausrichtung des Fokus musste als erstes die Bildreihe in „Lytro Desktop“ bearbeitet werden. Damit die Neuausrichtung des Fokus erkennbar wird, war die Idee, die Refokussierung in der laufenden Sequenz zu ändern. Um das zu realisieren, blieben die ersten Bilder so fokussiert wie in der Aufnahme, danach folgt die Änderung des Fokus schrittweise und die letzten Bilder mussten auf die neue Fokusebene eingestellt werden. Damit ergab sich für die Sequenzen eine Sekunde (25 Bilder) wie die Aufnahme, ein bis zwei Sekunden (25 – 50 Bilder), in der sich der Fokus schrittweise ändert, und eine Sekunde (25 Bilder) mit der neuen Fokusebene. Dementsprechend geschah die Bearbeitung in Lytro Desktop Bild für Bild. Nützlich für

<sup>135</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

diesen Schritt war die Filmstreifendarstellung, um die Änderungen unmittelbar zu sehen und zwischen den Bildern zu wechseln.

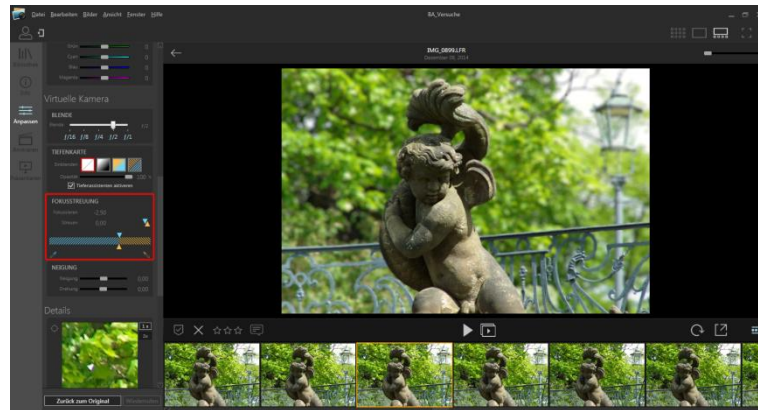


Abbildung 43: Fensteransicht von Lytro Desktop und die Fokusstreuung-Funktion<sup>136</sup>

In der Software von Lytro gibt es zwei Möglichkeiten, um den Fokus zu ändern. Zum einen kann der Fokus durch einen einfachen Mausklick an die gewünschte Stelle im Bild erfolgen. Diese Methode war allerdings für diesen Versuch zu ungenau. Die zweite Möglichkeit besteht darin, die Fokusebene über den Arbeitsbereich „Anpassen“ und die Funktion „Fokusstreuung“ numerisch zu verändern. Um die Werte für die Start- und Zielebene der Fokussierung zu bekommen, wurde der Fokuswert der Aufnahme genommen und der Zielwert über ein Mausklick auf das zu fokussierende Objekt. Für die einzelnen Zwischenwerte wurde die Differenz zwischen den beiden Werten durch die Anzahl der Bilder, in der die Refokussierung stattfinden soll, geteilt. Die errechnete Schrittweite wurde in jedem Bild dem Wert des vorhergehenden Bildes summiert, bis der ermittelte Zielwert erreicht war. „Lytro Desktop“ speichert die Änderungen an den Bildern automatisch. Als Beispiel soll die Sequenz „Skulptur\_Refokussed“ dienen. Hier beginnt der Fokus im Hintergrund auf den Baumkronen und verschiebt sich auf die Skulptur im Vordergrund. In Lytro liegt der Wert der Fokussierung für die Baumkronen auf 3,5 und die Skulptur hat den Fokuswert -2,5. Die Differenz zwischen beiden Werten beträgt 6. Der Fokus soll sich über eine Zeit von zwei Sekunden verschieben, das entspricht in diesem Fall 50 Bildern. Dadurch ergibt sich für die Schrittweite pro Bild ein Wert von 0,12. Nachdem die Bildfolge überarbeitet war, wurde sie wie bereits erklärt als JPS-Datei exportiert. Es folgte die Teilbildtrennung über Stereo Photo Maker und anschließend der Import in After Effects als PNG-Sequenz sowie die Verlinkung mit dem Null-Objekt, um die sprunghaften Fehler zu korrigieren. Im Anschluss fand der Export als Videodatei und das Zusammenfügen der stereoskopischen Teilsequenzen in Stereo Movie Maker als Color-Anaglyph und Side-by-Side-Video statt.

<sup>136</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

## 5.4.2 Arbeitsschritte Schärfentiefenausdehnung für die All in Focus-Sequenzen

In diesem Kapitel werden die Arbeitsschritte für die Sequenzen beschrieben, in denen eine Ausdehnung der Schärfentiefe vollzogen wird. Wie bei der Neuausrichtung des Fokus, sollte die Ausdehnung der Schärfentiefe innerhalb der Sequenz ausgeführt werden. Das bedeutet für die zu entstehende Sequenz, dass eine Sekunde wie die Aufnahme blieb. In einer bis zwei Sekunde erfolgt die Änderung der Schärfenausdehnung. Die letzte Sekunde zeigt die Szene, in der alle Bestandteile scharf abgebildet werden. Die Umsetzung der Schärfentiefenausdehnung erfolgte in „Lytro Desktop“. Für den Versuch wurde die Blende der virtuellen Kamera innerhalb der Software angepasst. Diese Funktion findet man im Arbeitsbereich „Anpassen“. Da die Bilder in „Lytro Desktop“ noch mit den gespeicherten Eigenschaften für die Neuausrichtung des Fokus hatten, mussten alle Bilder zurückgesetzt werden. Dazu wählt man alle Bilder in der Miniaturansicht an und bestätigt im Arbeitsbereich „Anpassen“ die Schaltfläche „Zurück zum Original“. In der Software wird dann ein Hintergrundprozess gestartet und die ausgewählten Bilder werden zurückgesetzt. Das bedeutet, dass die Bilder zurück auf die ursprünglichen Eigenschaften eingestellt werden.

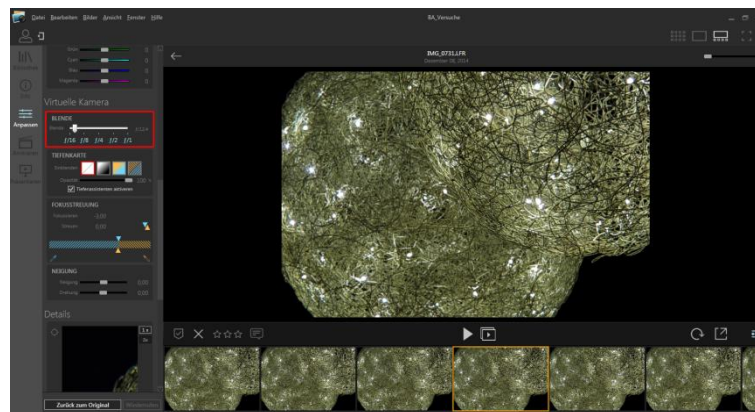


Abbildung 44: Fensteransicht von Lytro Desktop und die Blende der virtuellen Kamera<sup>137</sup>

Generell entspricht die Blendenzahl der virtuellen Kamera  $f/2$ , da bekanntlich die Lytro Illum mit einer festen Blende  $f/2$  ausgestattet ist. In der Software von Lytro ist es möglich die Blende im Nachhinein zu beeinflussen. Der Wert der Blende kann zwischen  $f/1$  bis hin zu  $f/16$  variiert werden. In der Foto- und Videografie reguliert die Blende nicht nur die Menge des eintreffenden Lichts, sondern sie beeinflusst ebenso die Schärfentiefe, also den Bereich, der scharf im Bild dargestellt wird. Bei einer geöffneten Blende, also einer kleinen Blendenzahl, ist der Bereich der scharf abgebildet werden kann, gering. Je mehr die Blende geschlossen wird (steigende Blendenzahl), desto weiter ers-

<sup>137</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation



treckt sich der Bereich, der scharf abgebildet werden kann. Wird in „Lytro Desktop“ die virtuelle Blende geändert, so verändert sich nicht die Belichtung des Bildes, sondern ausschließlich die Schärfentiefe im Bild. Für den Versuch sollte sich die Schärfentiefe in einer bestimmten Zeit ändern. Im Beispiel der „Netzlampe\_AllInFokus“ erfolgte diese Änderung innerhalb von zwei Sekunden, was in diesem Fall 50 Bildern entspricht. Die Blende sollte sich in 50 Bildern von  $f/2$  auf  $f/16$  ändern, das entspricht 14 Blenden in 50 Bildern. Daraus ergibt sich eine Schrittweite von 0,28 virtuellen Blenden, die der Blende des vorhergehenden Bildes hinzugefügt wurden. Die ersten 25 Bilder behielten die Standardblende  $f/2$  und die letzten 25 Bilder wurden auf  $f/16$  umgestellt. Nachdem alle nötigen Einstellungen fertiggestellt waren, erfolgte der Export der Bildreihe als JPS-Datei und die bereits beschriebene Prozedur zur Erstellung der stereoskopischen Sequenzen.

### 5.4.3 Arbeitsschritte perspektivische Verschiebung für die Parallaxe-Sequenzen

In diesem Kapitel werden die Arbeitsschritte beschrieben, die für die Umsetzung der perspektivischen Verschiebung durchgeführt wurden. In den Sequenzen, die mit „\_Parallaxe“ gekennzeichnet sind, soll die Möglichkeit der perspektivischen Verschiebung, durch eine kreisförmige Bewegung im Uhrzeigersinn um das Objekt, visualisiert werden.

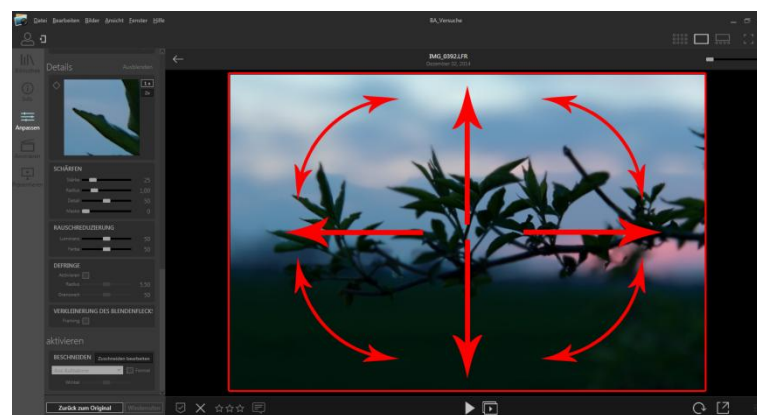


Abbildung 45: Perspektivische Verschiebung in Lytro Desktop<sup>138</sup>

Die Umsetzung der perspektivischen Verschiebung gestaltete sich etwas schwieriger, da sich die Verschiebung in „Lytro Desktop“ nicht über einen Schieberegler oder numerischen Wert ändern lässt. Die Perspektive kann lediglich mit einer Mausbewegung bei gehaltener Maustaste beeinflusst werden. Die Bewegung um den Bildmittelpunkt ist

<sup>138</sup> Quelle: Fechner, Philipp: Screenshot für Versuchsdokumentation

kreisförmig begrenzt, daher ergibt sich für die Verschiebung in den Sequenzen eine kreisförmige Änderung. Der Zeitraum wurde auf zwei Sekunden und demzufolge auf 50 Bilder beschränkt. Das erste Bild beginnt mit dem untersten Blickwinkel, der durch eine geradlinige Mausbewegung nach unten einstellbar ist. Die darauffolgenden Bilder wurden schrittweis nach links oben verschoben, bis der Blickwinkel, der mit einer Mausbewegung an den linken Bildrand entsteht, erreicht war. Diese Herangehensweise wurde solange fortgesetzt bis eine ganze Runde komplettiert war. Im Anschluss daran folgte der Export als JPS-Datei, die Teilbildtrennung, die Erstellung der Teilsequenzen und die Zusammenführung der stereoskopischen Sequenzen in Color-Anaglyph und als Side-by-Side.



## 6 Zusammenfassung

Im diesem Kapitel werden alle wesentliche Erkenntnisse über die Lichtfeldtechnik und die Möglichkeiten, die sich für die Nachbearbeitung von Foto- und Videomaterial ergeben, zusammengetragen. Es ist festzuhalten, dass die Lichtfeldtechnologie keine reine stereoskopische Aufnahmetechnik ist. Die stereoskopische Bildgewinnung ist vielmehr ein Nebenprodukt, das aus einem gesammelten Lichtfeld gewonnen werden kann. Das Spektrum der Bildberechnung aus einem Lichtfeld lässt sich sowohl auf 2D- als auch 3D-Produktionen anwenden.

### 6.1 Zusammenfassung für die Erstellung der stereoskopischen Sequenzen

Die in dieser Arbeit dokumentierten Versuche haben gezeigt, dass eine Stereosequenzerstellung mit der „Lytro Illum“ realisierbar ist. Aufgrund der fehlenden Videofunktion ist die Erstellung allerdings nur über Stop Motion umsetzbar. Die Bildgewinnung für die stereoskopischen Bilder kann bislang nur über verschiedene Programme erfolgen. Das macht die Nachbearbeitung aufwendig. Die entstandenen Fehler bei der Durchführung und die damit verbundene Fehlerkorrektur erübrigen sich, wenn künftige Modelle über eine Videofunktion verfügen. Ebenso können bessere Ergebnisse über Stop Motion erzielt werden, wenn die verwendete Zusatztechnik entsprechend hochwertig gewählt wird.

Die Arbeit bestätigt, dass sich Lichtfeldkameras in den Produktionsprozess integrieren lassen. Die Möglichkeiten der Bearbeitung von Lichtfeldmaterial erweitern auch den Spielraum in der Postproduktion. Allerdings ist durch die überschaubare Verbreitung der Technologie das Softwareangebot für die Bearbeitung der Lichtfelddaten entsprechend gering, da die Daten in der Regel nur mit der Herstellersoftware eingelesen werden können. Interessant werden die Lichtfelddaten, wenn eine Verwendung in verschiedenen Bildbearbeitungsprogrammen möglich ist, ohne die Herstellerprogramme nutzen zu müssen. Ein großer Vorteil der Lichtfeldtechnologie besteht darin, dass sie sowohl für zweidimensionale als auch für stereoskopische Aufnahmen einsetzbar ist. Die gestalterischen Mittel, die sich durch Lichtfeldaufnahmen ergeben, sind vielversprechend, müssen allerdings in der Praxis weiter erprobt werden.

## **6.2 Erkenntnisse aus der Versuchsdurchführung**

### **6.2.1 Vorteile im Bezug auf S3D-Produktion**

Durch die Teilbildgewinnung aus den Teilaperturen ergeben sich für Stereo 3D einige Vorteile gegenüber herkömmlichen Stereosystemen. Ein erheblicher Vorteil ist, dass die Ausrichtung der Kameras durch die Arbeit mit einer Lichtfeldkamera entfällt. Das mindert die Aufbauzeit bei Produktionen enorm. Da die Lichtfeldkamera aus genau einem optischen System besteht, entstehen in den gerenderten Bildern keine Unterschiede in Farbe, Kontrast und Helligkeit. Ebenso sind der Schärfentiefebereich und die Lage der Fokusebene für beide Teilbilder gleich. Dadurch können keine Störungen, die durch unterschiedliche Schärfentiefen oder farbliche Unterschiede entstehen, auftreten. Aufgrund der Bauform der Lichtfeldkamera ist sie gegenüber herkömmlichen Systemen kleiner und handlicher. Dadurch ergeben sich Einsatzmöglichkeiten für Orte, an denen kein Platz für ein großes Rig-System wäre. Ein weiterer Vorteil ergibt sich in der Stereoskopie für die Stereobasis. Durch die Einzelbildberechnung über der Hauptlinse ist es möglich, die Stereobasis nachträglich zu verändern. Das bedeutet, dass die Stereobildpaare entweder über den maximalen Linsendurchmesser berechnet werden können oder in einem beliebigen Abstand dazwischen. Das eignet sich besonders für Nahaufnahmen und Detailschüsse.

### **6.2.2 Nachteil im Bezug auf S3D-Produktion**

Die Lichtfeldkamera eignet sich nicht für alle Distanzen, sondern bietet sich eher bei Nah- oder Makroaufnahmen an. Das hängt mit der maximalen Stereobasis einer Lichtfeldkamera zusammen, die bekanntlich auf den Linsendurchmesser begrenzt ist. Ein weiterer Nachteil ist die feste offene Blende der „Lytro Illum“, die eine geringe Schärfentiefe hervorruft. Dadurch ist ein großer Schärfentiefebereich für S3D mit einem hohen Objektabstand verbunden. Die Schärfentiefe kann nachträglich beeinflusst werden, was bei einer Produktion jedoch eingeplant und getestet werden muss. Abhilfe schafft die Möglichkeit, die erweiterte Schärfentiefe während der Aufnahme einblenden zu können. Eine Schwachstelle für die Stereoskopie ist, dass keine Konvergenzeinstellungen durchgeführt werden können. Allerdings lassen sich die Konvergenz und damit die Festlegung der Scheinfensterenebene auch in der Postproduktion durch die Teilbildausrichtung realisieren. Ein weiterer Nachteil liegt in Nachbearbeitung der Lichtfelddaten. Die Nachbearbeitung findet bisher überwiegend in der Herstellersoftware statt. Ein Importieren der Rohdaten in die Software von Drittanbietern ist leider nicht oder mit Komplikation möglich.

### **6.2.3 Möglichkeit für die Erstellung strukturbehafteter Computermodelle**

Aus den gewonnenen Daten und den Informationen der Lichtfelddaten lassen sich strukturierte Computermodelle erstellen. Das gelingt durch die Tiefeninformationen, die aus dem Lichtfeld gewonnen werden können. Dazu werden korrespondierende Punkte in nebeneinanderliegenden Mikrolinsen berechnet. Die Tiefeninformationen lassen sich über eine sogenannte Tiefenkarte ausgeben. Eine Tiefenkarte ist ein zweidimensionales Bild, in dem die Tiefe der aufgenommenen Szene über verschiedene Graustufen angezeigt wird. Das ist insbesondere für die Postproduktion und hier besonders für das Erstellen von Computermodellen interessant. Denkbar ist für die Umsetzung das sogenannte Structure-from-Motion-Verfahren, mit dem anhand von 2D Bildinformationen eine 3D Oberflächenberechnung durchgeführt werden kann. Eine Herangehensweise, um strukturierte Modell zu konstruieren, wäre die Umwandlung der Tiefenkarten in Punktwolken, die die Lage der Punkte im dreidimensionalen Raum darstellen. Die Punktwolken können im nächsten Schritt zu einem Polygonnetz zur Modellierung von 3D-Objekten verwendet werden. Die genauere Behandlung dieses Sachverhalts bietet sich z.B. als Thema für eine weitere Abschlussarbeit an.<sup>139</sup>

## **6.3 Möglichkeiten und visuelle Effekte für die Postproduktion**

Die Verwendung von Lichtfeldmaterial vergrößert die Möglichkeiten in der Postproduktion. Zum Beispiel für die Fehlerkorrektur von Unschärfe. Darüber hinaus bieten sich auch gestalterische Mittel und visuelle Effekte zur Umsetzung in der Postproduktion.

### **6.3.1 Neuausrichtung des Fokus und Schärfentiefenausdehnung**

Durch die Neuausrichtung des Fokus lassen sich in der Produktion entstandene Fehler durch geeignete Maßnahmen in der Postproduktion korrigieren. Das bietet sich insbesondere bei Szenen mit einer geringen Schärfentiefe an und kann aufwändige Neuaufnahmen ersparen. Durch die Lichtfelddaten kann die Schärfentiefe erweitert oder reduziert werden. Diese Möglichkeit der Nachbearbeitung kann in 3D-Produktionen dafür genutzt werden, um die Schärfentiefe einer Szene für eine angenehme Betrach-

---

<sup>139</sup> Perwaß, Christian / Wietzke, Lennart: Bilderfassung und Bildverarbeitung, Mikrolinsen – basierte 4D Lichtfeldkarten zur räumlichen Bilderfassung durch ein einziges Objektiv, Photonik, Ausgabe 06-2010, S38 f.

tung anzupassen. Eine andere Möglichkeit ist, der Einsatz einer nachträglichen Verlagerung der Schärfe als gestalterisches Mittel in einem bestimmten zeitlichen Verlauf, der sowohl schnell also auch langsam vollzogen werden kann. Der zeitliche Verlauf kann durch die Postproduktion festgelegt werden.<sup>140</sup>

### 6.3.2 Rendern in z-Richtung

Über das Rendering in z-Richtung können virtuelle Fahrten simuliert werden. Dazu werden die Bilder aus den Lichtstrahlen berechnet, die aus den unterschiedlichen Sub-Apertur-Bildern gewonnen werden. Mit dieser Methode lässt sich die Position der virtuellen Kamera mit einer Bewegung auf das Objekt zu oder von einem Objekt weg simulieren. Im Gegensatz zu einem digitalen Zoom ändern sich dabei die Verdeckungen und die Aufdeckungen wie bei einer Kamerafahrt. In Kombination mit der Neuausrichtung des Fokus kann in der Postproduktion der sogenannte Vertigo-Effekt oder Dolly-Zoom erzeugt werden. Dabei handelt es sich um einen Effekt, bei dem ein Objekt in einer gewählten Einstellungsgröße bleibt und sich der Hintergrund erweitert oder verengt. Das erfolgt beispielsweise durch eine Fahrt auf das Objekt zu, gleichzeitig wird die Brennweite auf den Bildausschnitt angepasst und der Fokus auf das Objekt gerichtet.<sup>141 142</sup>

### 6.3.3 Free View Point

Aus dem aufgenommenen Lichtfeld können beliebige Teilaperturbilder gewonnen werden. Das Ausmaß ist bekanntlich auf den physischen Durchmesser der Objektivlinse begrenzt. Damit kann eine virtuelle Kamera an jeden Blickwinkel, der über die Hauptlinse entsteht, berechnet werden. Daraus ergeben sich gestalterische Mittel mit einer Verschiebung des Blickwinkels. Besonders für die Stereoskopie ist interessant, dass die Stereobildpaare berechnet werden können, die einer Stereobasis bis gegen Null entsprechen. Mit anderen Worten kann die Stereobasis nachträglich am Computer für eine angenehme Betrachtung angepasst werden.<sup>143 144</sup>

---

<sup>140</sup> Vgl. Zilly, Frederik; Ziegler, Mathias: Lichtfeldaufnahmesysteme für variable Perspektive und Tiefenschärfe in der Postproduktion, FKT, Ausgabe 12/2014, S.658 f.

<sup>141</sup> Vgl. Foessel, Siegfried; Hueller Wolfgang; Schäfer, Peter; Zilly, Frederik: Postproduktion für Kamera-Arrays, 2013, S.142

<sup>142</sup> Vgl. Zilly, Frederik; Ziegler, Mathias: Lichtfeldaufnahmesysteme für variable Perspektive und Tiefenschärfe in der Postproduktion, FKT, Ausgabe 12/2014, S.659

<sup>143</sup> Vgl. Foessel, Siegfried; Hueller Wolfgang; Schäfer, Peter; Zilly, Frederik: Postproduktion für Kamera-Arrays, 2013, S.143

<sup>144</sup> Vgl. Zilly, Frederik; Ziegler, Mathias: Lichtfeldaufnahmesysteme für variable Perspektive und Tiefenschärfe in der Postproduktion, FKT, Ausgabe 12/2014, S.659

## 6.4 Ausblick

Die Zukunft für die Lichtfeldtechnologie wird für den Konsumenten mit Sicherheit nicht bei einer Fotokamera stehenbleiben. In einem Interview gab Ren Ng, Gründer und Vorstandsvorsitzender von Lytro, einen Ausblick auf die folgende Entwicklung und sprach von einer Lichtfeld-Videokamera. Dabei wären Bildwiederholungsfrequenzen von 50 oder 60 Bildern pro Sekunde denkbar. Die beschriebenen Nachbearbeitungsmöglichkeiten wären natürlich auch in einem Lichtfeldvideo anwendbar. Aktuell gibt es bereits erste Lichtfeld-Videokameras (Raytrix) für den Einsatz in der Industrie. Diese Kameras eignen sich für einen stationären Gebrauch und nicht für eine Videoproduktion, da sie zusätzliche Technik benötigen, um die Daten zu verarbeiten. Ein weiterer Schritt in der Entwicklung wird die Vergrößerung der Auflösung sein.<sup>145</sup>

Auch Softwarehersteller werden sich in Zukunft auf die Verarbeitung von Lichtfelddaten einstellen. Das Fraunhofer Institut entwickelt aktuell ein Software Plug-In für den AVID Media Composer. Das Plug-In ist für die Verarbeitung der Lichtfelddaten aus einem Mehrkamerasystem, also einem Array aus vielen Kameras, vorgesehen. Es soll dem Nutzer eine Bedienoberfläche geben, da die herstellereigenen Programme für die Postproduktion schwer handhabbar sind. Die Parametereinstellungen für die Möglichkeiten der Nachbearbeitung der Lichtfelddaten, sollen sich in diesem Plug-In an der üblichen Bedienung über Timeline und Slider orientieren.<sup>146</sup> Auch Winston Hendrickson, Vice President of Engineering for Digital Imaging bei Adobe, gab in einem Interview zu verstehen:

*„We will introduce light-field editing in Photoshop when the time is right, but it's not ready for a broad scale right now.“<sup>147</sup>*

---

<sup>145</sup> Profifoto Spezial 141, Sonderheft für professionelle Fotografie „Lytro Illum“, S.8

<sup>146</sup> Vgl. Fraunhofer Institut: Fraunhofer IIS stellt neues Software-Plug-In für die Bearbeitung von Lichtfelddaten vor, Presseinformation, 12.09.2014, <http://www.dcinema.fraunhofer.de/de/medienportal/meldungen-2014/Lichtfeld-Postproduktion.html>, (Zugriff: 30.06.2015)

<sup>147</sup> Harris Mark: Light-Field Photography Revolutionizes Imaging, IEEE Spectrum, 2012, <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/lightfield-photography-revolutionizes-imaging/0>, (Zugriff: 30.06.2015)

## Literaturverzeichnis

Edward H.; Wang John Y.A.: Single Lens Stereo with a plenoptic Camera, [http://persci.mit.edu/pub\\_pdfs/plenoptic.pdf](http://persci.mit.edu/pub_pdfs/plenoptic.pdf), (Zugriff: 27.04.2015)

Beyerer, Jürgen / León, Fernando Puente / Frese, Christian: Automatische Sichtprüfung, Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012,

Blachowicz, Tomasz; Ehrmann Andrea: Plenoptische Kameras, Fotografieren in der vierten Dimension, Weinheim, 2012, DOI: 10.1002/piuz.201201295

Bomancz, Tycho: Lichtfelder und Linsen, Seminar Visual Computing, Stuttgart, 2011, [https://www.vis.uni-stuttgart.de/uploads/tx\\_visteaching/Lichtfelder-und-Linsen-Ausarbeitung\\_02.pdf](https://www.vis.uni-stuttgart.de/uploads/tx_visteaching/Lichtfelder-und-Linsen-Ausarbeitung_02.pdf) (Zugriff: 07.01.2015)

Bolliger, Matthias (2011): Stereo-3D. Film & TV Kameramann, eDossier Ausgabe 1&2, 2011

Ditzinger, Thomas: Illusion des Sehens, Eine Reise in die Welt der Visuellen Wahrnehmung, 2. überarbeitete Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2013

Frings, Stephan / Müller, Frank: Biologie der Sinne, Vom Molekül zur Wahrnehmung, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2014

Foessel, Siegfried; Hueller Wolfgang; Schäfer, Peter; Zilly, Frederik: Postproduktion für Kamera-Arrays, 2013, [http://www2.tu-ilmenau.de/zsmp/sites/default/files/5/1\\_S3D%20in%20der%20MP.pdf](http://www2.tu-ilmenau.de/zsmp/sites/default/files/5/1_S3D%20in%20der%20MP.pdf), (Zugriff: 29.06.2015)

Fraunhofer Institut: Fraunhofer IIS stellt neues Software-Plug-In für die Bearbeitung von Lichtfelddaten vor, Presseinformation, 12.09.2014, <http://www.dcinema.fraunhofer.de/de/medienportal/meldungen-2014/Lichtfeld-Postproduktion.html>, (Zugriff: 30.06.2015)

Hagendorf, Herbert u.a.: Wahrnehmung und Aufmerksamkeit, Allgemeine Psychologie für Bachelor, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2011

Harris Mark: Light-Field Photography Revolutionizes Imaging, IEEE Spectrum, 2012, <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/lightfield-photography-revolutionizes-imaging/0>, (Zugriff: 30.06.2015)

- Hauger, David: Anaglyphen, 2006,  
<http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen%3AAllgemeine/module/13889?step=all#chapter>, (Zugriff: 13.04.2015)
- Hemmo, Max: s3D now!, A Stereoscopic Experiment for Film and TV, Berlin 2012
- Leipniz - Institut für Astrophysik Potsdam, Polarisiertes Licht,  
<http://www.aip.de/de/forschung/forschungsschwerpunkt-kmf/cosmic-magnetic-fields/sonnenphysik/optische-sonnenphysik/forschungsprogramm/polarisiertes-licht>,  
(Zugriff am 14.04.2015 16:29 Uhr)
- Levoy, Marc: Light Fields and Computational Imaging, Stanford, USA, 2006,  
<https://graphics.stanford.edu/papers/lfphoto/levoy-lfphoto-ieee06.pdf>, (Zugriff: 07.05.2015)
- Lytro Inc; Consutecc GmbH: Lytro Illum, Datenblatt,  
[http://www.consutecc.com/images/pdf/Lytro\\_ILLUM\\_Datenblatt.pdf](http://www.consutecc.com/images/pdf/Lytro_ILLUM_Datenblatt.pdf), (Zugriff: 12.05.2015)
- Lytro Illum User Manual, <http://manuals.lytro.com/illum/full-manual/>, (Zugriff: 12.05.2015)
- Lytro Support: Lytro Desktop, Main Overview, <https://support.lytro.com/hc/en-us/articles/202590364-Lytro-Desktop-4-Main-Overview> (Zugriff: 12.05.2015)
- Marczok Michael: Lichtfeld in der Studiopraxis, digit!, Das Profimagazin für Digitale Bilder, Ausgabe 2-2015
- Mendiburu, Bernard: 3D Movie Making, Stereoscopic Digital Cinema from Script to Screen, Burlington, USA, 2009
- Michel, Benoit: Digital Stereoscopy, Scene to Screen 3D Production Workflow, Sprimont, Belgien, 2013
- Ng, Ren: Digital Lightfield Photography, Stanford, 2006,
- Ng, Ren: Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera, Stanford, 2005
- Perwaß, Christian / Wietzke, Lennart: Bilderfassung und Bildverarbeitung, Mikrolinsen – basierte 4D Lichtfeldkarten zur räumlichen Bilderfassung durch ein einziges Objektiv, Photonik, Ausgabe 06-2010

Profifoto Spezial 141, Sonderheft für professionelle Fotografie „Lytro Illum“, [http://www.profifoto.de/fileadmin/profifoto/pdf/PF\\_Spezial\\_141.pdf](http://www.profifoto.de/fileadmin/profifoto/pdf/PF_Spezial_141.pdf)

Schmidt, Ulrich: Professionelle Videotechnik, Grundlagen, Filmtechnik, Fernsehtechnik, Geräte- und Studioteknik in SD, HD, DI, 3D, 6. Auflage, Berlin, 2013

Schmid, Katrin: Diplomarbeit, Animation mit bildbasierter Szenenrepräsentation, Weimar 2003, [http://www.lo-motion.de/z/Diplom\\_Bildschirmversion.pdf](http://www.lo-motion.de/z/Diplom_Bildschirmversion.pdf), (Zugriff am 12.05.2015)

StereoPhoto Maker, Homepage, <http://stereo.jp/ger/stphmkr/index.html>

Tauer, Holger: Stereo 3D, Grundlagen, Technik und Bildgestaltung, 1. Auflage, Berlin, 2010

Wehner, Andreas: Die plenoptische Kamera (Lichtfeldkamera) - Technik und Anwendung, Studentische Ausarbeitung, München 2013, S.18, [http://www.pf.bgu.tum.de/edu/pak/tum\\_pak\\_13\\_wehner\\_pre\\_sp2.pdf](http://www.pf.bgu.tum.de/edu/pak/tum_pak_13_wehner_pre_sp2.pdf), (Zugriff am 12.05.2015)

Wimmer, Peter: Aufnahme und Wiedergabe stereoskopischer Videos im Anwendungsbereich der Telekooperation, Linz, 2004

Wimmer, Peter: Vergleich von Anaglyphenverfahren  
[http://www.3dtv.at/knowhow/AnaglyphComparison\\_de.aspx](http://www.3dtv.at/knowhow/AnaglyphComparison_de.aspx), (Zugriff am 09.04.2015 20:01 Uhr)

Zilly, Frederik; Ziegler, Mathias: Lichtfeldaufnahmesysteme für variable Perspektive und Tiefenschärfe in der Postproduktion, FKT, Ausgabe 12/2014



# Anlagen

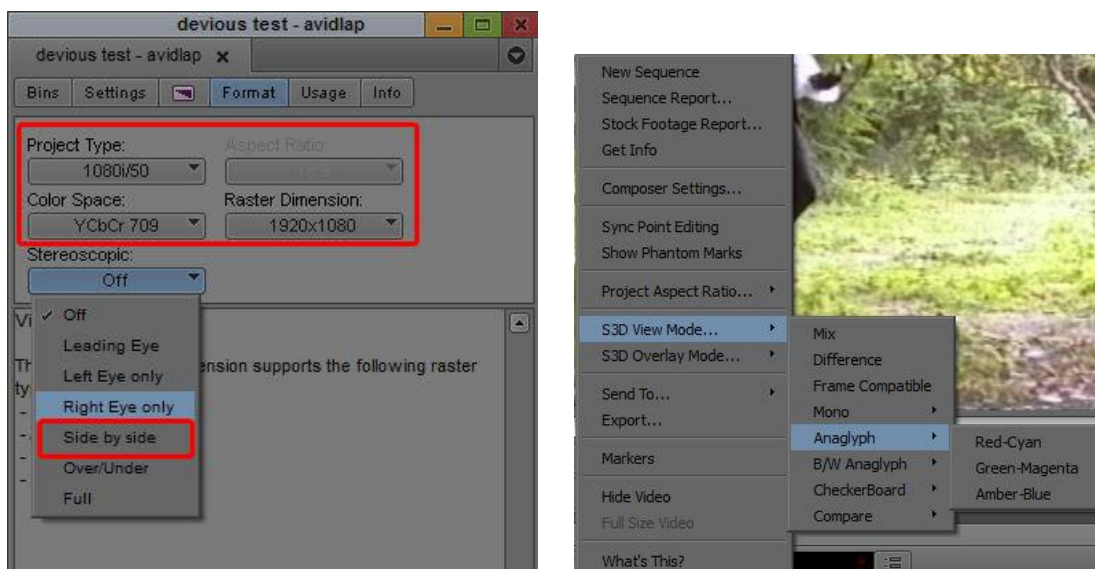
## Überblickstabelle der technischen Daten der Lytro Illum

<b>Allgemein</b>	
Produkt	LYTRO ILLUM
Abmessungen	86 mm x 145 mm x 166 mm
Gewicht	940 g
Gehäuse	Magnesium und Aluminium
Griff und Objektivringe	Silikon
<b>Objektiv</b>	
Brennweite (entspricht 35 mm)	9,5-77,8 mm (entspricht 30-250 mm)
Formatfaktor	3,19
Zoom	8-fach
Blendenzahl	f/2.0 (fest)
Makro	Fokus bis zu 0 mm Objektabstand
Makroverhältnis	01:03
<b>Bildsensor</b>	
Sensortyp	CMOS
Lichtfeldauflösung	40 Megaray
Prozessor	Snapdragon®-Prozessor von QUALCOMM® Incorporated
Sensorformat	1/1,2 Zoll
Aktiver Bereich	10,82 x 7,52 mm
<b>Bild</b>	
Format	Lichtfeldbild
Auflösung bei 2D-Export	4 MP Spitzenleistung
Benutzerdefinierter Weißabgleich	Ja
Datei-/Bildspeicher	SD-Speicherkartensteckplatz (SD-Karte nicht im Lieferumfang enthalten)
<b>Verschluss</b>	
Verschlusstyp	Schlitzverschluss
Kürzeste Belichtungszeit	1/4000 s
Längste Belichtungszeit	32 s
Optionen für Serienaufnahmen	Einzelbild oder Serie
Selbstausröser	Ja
<b>Belichtung</b>	
Belichtungsmesssystem	Mehrfeldmessung
Belichtungshistogramm	In Liveansicht und Wiedergabe
Belichtungsmodi	Programm-, ISO- und Blendenautomatik, Manuell
Belichtungs Korrektur	Ja
Belichtungsreihe	Ja
Belichtungssperre	Ja
Clipping-Warnung	Ja
<b>Fokus/Autofokus</b>	
Autofokusmodi	Mehrbereich-AF
<b>Monitor</b>	
Touchscreen	Ja

Monitorgröße	4-Zoll-LCD-Bildschirm auf der Rückseite
Monitorauflösung	480 x 800
Betrachtungswinkel des Monitors	Bis 80 Grad
Regulierbare Helligkeit	Ja
Monitortyp	LCD mit Hintergrundbeleuchtung
Gelenkwinkel	-10 bis +90
Gelenk am LCD-Monitor	Doppelscharnier
Liveansicht	Ja
<b>Wiedergabe</b>	
Bildansicht in Kamera	Ja
Lichtfeld-Wiedergabefunktion	Neu fokussieren
<b>Menüs/Oberfläche</b>	
Anpassbare Schaltflächen	Ja
<b>Energie</b>	
Akku	Austauschbarer Lithium-Ionen-Akku
Laden des Akkus	Separates Ladegerät und USB
<b>Anschlussoptionen</b>	
Zubehörschuh	ISO-kompatibler Zubehörschuh mit Mittelstift und Lytro-TTL
Stativgewinde	Standard 1/4"-20
Kompatibel mit Fernauslöser	Ja
USB	Micro-USB 3.0
<b>Verschiedenes</b>	
Technologie	Lytro Light Field Sensor und Lytro Light Field Engine 2.0
Drahtlos	802.11a/b/g/n/ac aktiviert
Software	Beinhaltet eine kostenlose Desktop-Anwendung zum Importieren von Living Pictures von der Kamera sowie deren Bearbeitung. Mac OS 10.8.5 und höher, Windows 7 oder Windows 8 (64-Bit) erforderlich.
Entsorgung	RoHS-zertifiziert

## Kurzbeschreibung zur Betrachtung der Side-by-Side-Sequenzen in AVID Media Composer. (ab Version 6)

Als erstes wird ein neues Projekt angelegt und der Zielordner ausgewählt. Im nächsten Schritt werden die Projekteinstellungen festgelegt. Das Format sollte auf 1080p/25, der Color Space auf YCbCr 709, und die Raster Dimension 1920x1080 eingestellt werden. Unter dem Reiter Stereoscopic ist die Option Side by Side zu wählen. Als nächstes werden die Side-by-Side-Sequenzen importiert. Der Umgang mit dem stereoskopischen Material findet genau wie bei 2D-Material über den Quellband- und Zielbandmonitor statt. Um das stereoskopische Material über einen 3D-Monitor zu betrachten, kann die Ansicht mit einem Rechtsklick auf den Softwareinternen Monitor verändert werden. Das geschieht über die Option „S3D View Mode“. Um die linken und rechten Bildinformationen als stereoskopisches 3D anzuzeigen wählt man die Option „Full Frame“. Die Option ist nur mit der Verwendung eines 3D-Monitors verfügbar.



## Hinweis zu den Daten-DVDs

Die stereoskopischen Sequenzen befinden sich in archivierten Dateien auf den beigelegten DVDs. Die komprimierten Archive wurden mit 7zip erstellt. Eine Installationsdatei von 7zip befindet sich ebenfalls auf der DVD 1 (32 und 64 Bit), um die Archive zu dekomprimieren. Desweiteren befinden sich einzelne Lichtfeldaufnahmen aus den Sequenzen und zwei fehlerbehaftete Teilsequenzen auf den DVDs.

## **Daten-DVD 1**

### **Inhalt:**

7z920 (32Bit), 7z920-x64 (64Bit), ColorAnaglyph-Parallaxe, Side-by-Side-Refokused, Side-by-Side-WieAufnahme

## **Daten-DVD 2 und 3**

### **Inhalt:**

#### Seite A:

ColorAnaglyph-AllInFokus, ColorAnaglyph-Refokused, Side-by-Side-AllInFokus, Side-by-Side-Parallaxe

#### Seite B:

Fehlerhafte Teilsequenzen, Lichtfeldbilder, ColoAnaglyph-WieAufnahme

---

## **Anaglyphbrille**

## Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

---

Ort, Datum

Vorname Nachname